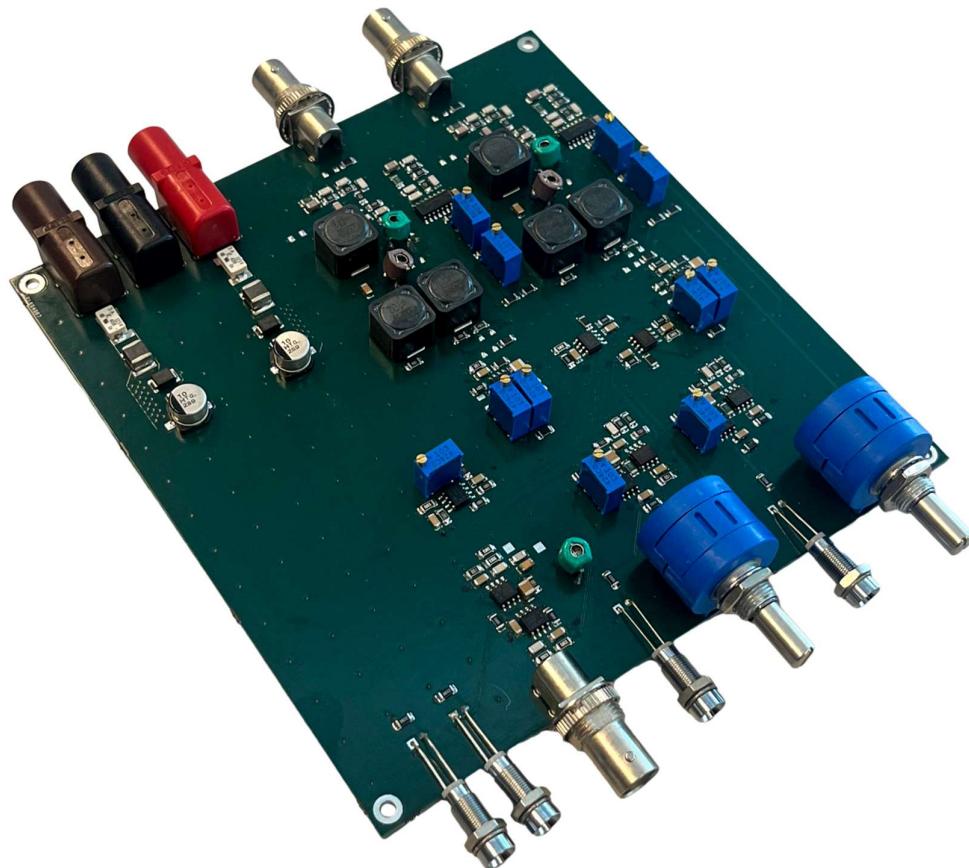


QCM Temperatuur Compensatie

Eindscriptie

19-5-2025

Leiden



HU HOGESCHOOL
UTRECHT



Universiteit
Leiden

QCM Temperatuur Compensatie

Eindscriptie

19-5-2025

Leiden



**HOGESCHOOL
UTRECHT**



**Universiteit
Leiden**

Versie: v1.0

Student: Flint Wardenaar
Studentnummer: 1771881
E-mail student: Flint.wardenaar@student.hu.nl

Onderwijsinstelling: Hogeschool Utrecht
Opleiding: Electrical Engineering
Eerste examinator: Hubert Schuit
Tweede examinator: Michiel Scager

Afstudeerbedrijf: Universiteit Leiden
Afdeling: Elektronische Dienst
Bedrijfsbegeleider: Harry Visser

Het bestuur van de Stichting Hogeschool Utrecht te Utrecht aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor schade voortvloeiende uit het gebruik van enig gegeven, hulpmiddel, werkwijze of procedure in dit verslag beschreven. Vermenigvuldiging zonder toestemming van de auteur(s), de school of het bedrijf (indien van toepassing) is niet toegestaan.

VOORWOORD

Voor u ligt de eindscriptie voor het QCM-temperatuurcompensatieproject, waarmee ik, Flint Wardenaar, dien af te studeren. Dit project wordt uitgevoerd in opdracht van en met ondersteuning van de Universiteit Leiden. Dit document heeft als doel de lezer een beeld te geven van het verloop van het project, de projectbeheersing, de gemaakte keuzes en de onderbouwing daarvan.

Ik ben erg dankbaar voor de kans om mijn afstudeeronderzoek uit te voeren bij de Universiteit Leiden, met een opdracht die mij bijzonder aanspreekt. Ik ben ervan overtuigd dat er geen betere afstudeerplek en geen geschiktere opdracht mogelijk waren.

Graag wil ik mijn begeleiders, Harry Visser en Raymond Koehler, bedanken voor hun steun en vertrouwen in mij. In het bijzonder wil ik Harry bedanken voor zijn eindeloze bereidheid om mee te denken en te sparren over mogelijke ontwerpoplossingen. Daarnaast ben ik mijn afstudeerbegeleider Michiel Scager zeer dankbaar, niet alleen voor zijn begeleiding tijdens mijn afstudeertraject, maar ook voor de afgelopen zes jaar waarin hij mij, vooral op het gebied van professionalisering, waardevolle lessen heeft geleerd. Zonder zijn begeleiding zou ik vandaag een heel ander persoon zijn.

Met veel enthousiasme呈enteer ik dit document.

Flint Wardenaar

19-3-2025

SAMENVATTING

Deze scriptie beschrijft het ontwikkeltraject van een quartz-crystal-microbalance (QCM) waarbij wordt gecompenseerd voor temperatuurveranderingen. Een QCM is een extreem gevoelige massasensor die veelal wordt ingezet in opdampopstellingen om de dikte van een neergeslagen materiaal laag te meten. Deze opdampopstellingen worden gebruikt voor het vervaardigen van onder andere supergeleiders, optische elementen en fotokathoden, waarbij het nauwkeurig bepalen van de laagdikte cruciaal is.

Een QCM werkt met een oscillerend kwarts kristal dat wordt blootgesteld aan de damp. Zodra materiaal zich op het kristal afzet, verandert de massa, wat resulteert in een verlaging van de resonante frequenties. Door deze frequentieverschuiving te meten, kan het verschil in massa en daarmee de laagdikte worden bepaald. Echter, tijdens het opdampen komt er veel warmte vrij waar het kristal door opwarmt. De warmte beïnvloedt de resonantiefrequentie van het kristal los van massatoename, wat leidt tot meetnauwkeurigheden. Voor toepassingen waarbij de gewenste laagdikte minder dan één atoom bedraagt, is dit onacceptabel.

Om dit probleem aan te pakken is in dit project het V-model toegepast. Deze projectaanpak is gekozen vanwege de gestructureerde indeling in fasen en de nadruk op vroegtijdige validatie door testen — een belangrijke stap bij de ontwikkeling van meetsystemen.

Uit het literatuur- en praktijkonderzoek bleek dat temperatuurcompensatie mogelijk is door te kijken naar twee resonantiemodi van hetzelfde kristal. Doordat deze modi verschillend reageren op temperatuurveranderingen, kan het temperatuurverschil uit de meting worden geëlimineerd. Kristallen met een specifieke snijhoek, de zogenaamde SC-cut kristallen, zijn hiervoor bijzonder geschikt. Deze bevatten een extra resonantiemode met een sterke temperatuurafhankelijkheid, wat gunstig is voor het compenseren van temperatuureffecten. Het lukte om dit principe experimenteel te reproduceren, al was de meetnauwkeurigheid beperkt door de gebruikte meetmethode.

In eerste instantie werd gekozen voor een ontwerp met twee afzonderlijke oscillatoren die elk een resonantiemode van het kristal aansturen. Uit simulaties bleek echter dat deze aanpak instabiel en moeilijk af te stellen is. Daarom werd overgeschakeld op een ontwerp gebaseerd op een phase-locked loop (PLL), een analoog regelsysteem waarbij het uitgangssignaal een vast faseverschil heeft t.o.v. het ingangssignaal. In dit ontwerp stuurt het uitgangssignaal van de PLL het kristal aan. Wanneer het kristal in resonantie komt, introduceert dit een faseverschuiving. Door het faseverschil tussen het uitgangssignaal en het kristalsignaal constant te houden, blijft de uitgangsfrequentie gelijk aan de resonantiefrequentie. Deze frequentie kan vervolgens worden uitgelezen met een externe frequentieteller. Door twee van zulke systemen parallel te gebruiken op hetzelfde kristal, kunnen twee resonantiemodi simultaan worden gemeten.

Het ontwerp van het systeem is succesvol gerealiseerd, maar tijdens het testen is gebleken dat het nog niet in staat is om de resonantiefrequentie van het kristal correct te volgen. Er wordt echter verwacht dat deze functionaliteit alsnog kan worden bereikt na het doorvoeren van enkele technische aanpassingen. Om het onderliggende probleem te achterhalen, is een reeks gerichte vervolgtests opgesteld, waarbij het systeem modulair wordt geanalyseerd. Wanneer het systeem op technisch niveau naar behoren functioneert, kunnen de geplande functionele tests worden uitgevoerd. Tijdens deze tests zal worden onderzocht in hoeverre temperatuurveranderingen daadwerkelijk kunnen worden gecompenseerd, zoals beoogd in de doelstelling van het project.

INHOUD

Voorwoord.....	2
Samenvatting.....	3
Inleiding	6
1 Organisatie en werkwijze.....	7
1.1 Organisatie.....	7
1.2 Werkwijze.....	8
2 Projectmanagement	10
2.1 V-Model	10
2.2 Toelichting fasen en mijlpalen.....	10
2.3 Strokenplanning V2	12
2.4 Evaluatie	13
3 Opdracht.....	14
3.1 Context.....	14
3.2 Probleemstelling	16
3.3 Opdrachtformulering.....	17
3.4 PvE – MoSCoW	17
3.5 Producten	18
4 Samenvatting onderzoek PID.....	19
4.1 Hoe werken bestaande QCM-systemen	19
4.2 Waardoor warmt het kristal op?	21
4.3 Wat is het effect van warmte op het kristal?.....	21
4.4 Hoe warm wordt het kristal?	21
4.5 Hoe kan temperatuur het best gecompenseerd worden?	21
5 Functioneel ontwerp.....	23
5.1 Wat is de gewenste frequentiemeetresolutie?	23
5.2 Welke modi zijn het beste geschikt voor temperatuur compensatie?	23
5.3 Hoe kan bij een dual-mode systeem de temperatuurgecompenseerde waarde berekend worden?.....	25
5.4 Hoe veel verschillen de eigenschappen tussen kristallen van dezelfde producent, verschillende batches en binnen de batch?.....	26
5.5 Hoe kunnen twee resonante frequenties gelijktijdig gemeten worden?	27
6 Technisch Ontwerp.....	31
6.1 Kristalaansturing	31
6.2 Fasevergelijker	33

6.3	Lock-detect.....	33
6.4	Loop-filter	33
6.5	VCO	34
6.6	Opteller.....	36
6.7	algemene ontwerpeigenschappen	36
6.8	Realisatie	38
7	Validatie	40
7.1	Testplannen	40
7.2	Testresultaten	43
8	Conclusie.....	50
	Bronnen	52
	Lijsten	54
	Lijst van afkortingen.....	54
	Lijst van figuren	55
	Lijst van tabellen	55
	Bijlagen	56
	Bijlage A - Organogram (groot).....	56
	Bijlage B - Strokenplanning V1 (PID).....	57
	Bijlage C - Strokenplanning Inhoudelijk V2.....	58
	Bijlage D - Strokenplanning Schoolproducten V2	59
	Bijlage F - Meegeleverde digitale bestanden	60

INLEIDING

Binnen de Universiteit Leiden wordt veel onderzoek gedaan naar onder andere supergeleiders, halfgeleiders en Optical Near-Field Electron Microscopy (ONEM). Al deze technologieën maken gebruik van opdampen: een proces waarbij een extreem dunne laag materiaal wordt aangebracht op een substraat. Om de laagdikte tijdens dit proces nauwkeurig te monitoren, wordt gebruikgemaakt van een Quartz Crystal Microbalance (QCM). Deze sensor is in staat om minimale massaveranderingen te detecteren door verschuivingen in de resonantiefrequentie van een oscillerend kwarts kristal. Wanneer atomaire lagen op het kristal neerslaan, neemt de massa toe, waardoor de frequentie verandert — een verandering die direct kan worden omgezet naar een meting van de laagdikte.

Een belangrijk probleem bij het gebruik van een QCM is de temperatuurgevoeligheid. Tijdens het opdampen wordt het kristal blootgesteld aan intense warmtestraling van het verdampende materiaal, wat leidt tot het opwarmen van het kristal. Omdat de resonantiefrequenties van het kristal ook afhankelijk zijn van temperatuur, ontstaan er foutmetingen die niet te onderscheiden zijn van massa-effecten. Dit vormt een belemmering voor toepassingen waarbij sub-monolaag precisie vereist is.

Het doel van dit project is om een QCM-systeem te ontwikkelen dat temperatuurcompensatie toepast, zodat de invloed van opwarming op de meting wordt geminimaliseerd. Het beoogde prestatieniveau is een reductie van de temperatuurafhankelijkheid van 2 ppm/°C naar 0,2 ppm/°C, over een temperatuurbereik van 20 °C tot 100 °C. Om dit te realiseren is gebruikgemaakt van een methode waarbij twee resonantiemodi van het kristal tegelijk worden gemeten. Omdat elke mode verschillend reageert op temperatuurveranderingen, kan uit het verschil tussen beide een temperatuurcompensatie worden afgeleid.

Voor de uitvoering van dit project is gekozen voor het V-model als ontwikkelmethode. Deze aanpak biedt een gestructureerde werkwijze waarbij elke ontwerp fase direct wordt gekoppeld aan een bijbehorende testfase. Binnen dit project zijn de fasen doorlopen van eisenanalyse, functioneel ontwerp en technisch ontwerp. Momenteel bevindt het project zich in de fase van de technische tests.

De opbouw van dit document volgt de stappen van het V-model. In hoofdstuk 1 wordt de organisatie en werkwijze toegelicht. Hoofdstuk 2 behandelt het projectmanagement, waaronder de gekozen aanpak en evaluatie daarvan. In hoofdstuk 3 wordt de opdracht geschat: de context, probleemstelling en eisen.

Hoofdstuk 4 vat het onderzoek uit het project-initiatie-document samen, gevolgd door het functioneel ontwerp in hoofdstuk 5 en het technisch ontwerp in hoofdstuk 6. Hierin worden alle subsystemen besproken en het uiteindelijke ontwerp gepresenteerd. In hoofdstuk 7 staan de testplannen en testresultaten. Het rapport sluit af met een conclusie.

1 ORGANISATIE EN WERKWIJZE

1.1 ORGANISATIE

1.1.1 Universiteit Leiden – Faculty of Science

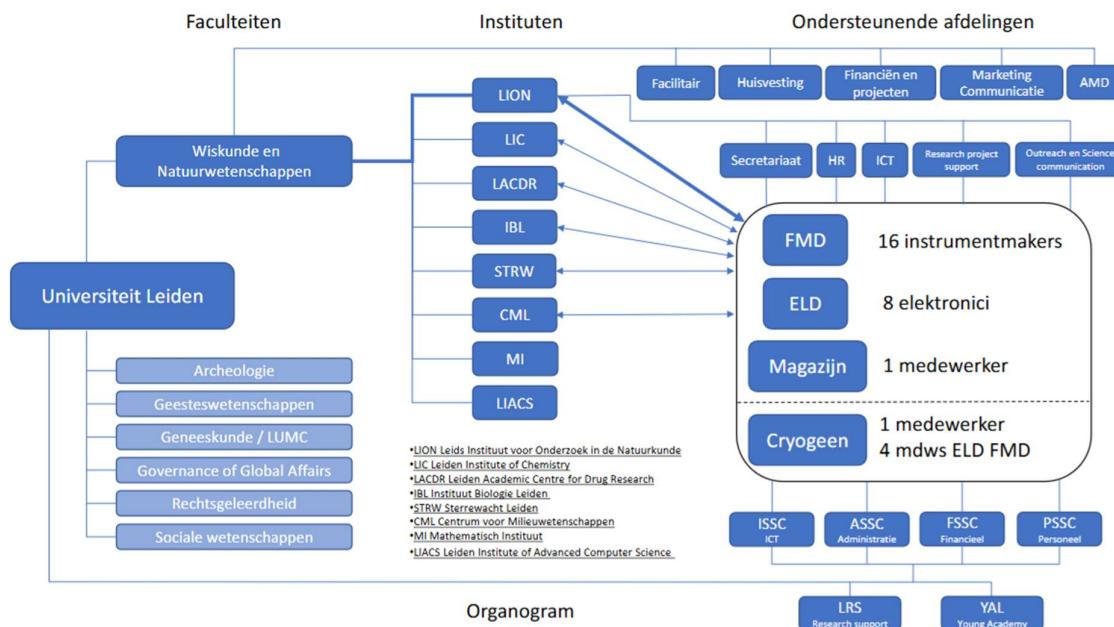
De Universiteit Leiden is een van de oudste en meest gerenommeerde universiteiten van Nederland. Binnen de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen (Faculty of Science) worden verschillende wetenschappelijke disciplines beoefend, waaronder natuurkunde, scheikunde en biowetenschappen. Het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION) is een van de belangrijkste instituten binnen deze faculteit en richt zich op fundamenteel en toegepast natuurkundig onderzoek.

1.1.2 Elektronische Dienst (ELD) en Fijn Mechanische Dienst (FMD)

Binnen de universiteit zijn de Elektronische Dienst (ELD) en de Fijn Mechanische Dienst (FMD) technische ondersteuningsafdelingen die op maat gemaakte oplossingen leveren voor wetenschappelijk onderzoek.

- De ELD richt zich op de ontwikkeling en realisatie van custom elektronica. Dit gebeurt uitsluitend wanneer commerciële oplossingen niet beschikbaar zijn, waardoor de ontwerpen vaak cutting-edge en sterk gespecialiseerd zijn.
- De FMD is verantwoordelijk voor de productie van op maat gemaakte mechanische componenten en precisie-instrumenten.

De ELD en FMD bestaan gezamenlijk uit ongeveer 24 medewerkers, waarvan 8 binnen de ELD en 17 binnen de FMD. Samen ondersteunen de ELD en FMD de onderzoeksprojecten van verschillende wetenschappelijke disciplines. Verreweg de meeste opdrachten komen vanuit het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION). In Figuur 1-1 (Vergroot in bijlage A) is de opbouw van de organisatie grafisch weergegeven.



Figuur 1-1: Organogram (klein) (Veldhuizen M., 2023)

1.2 WERKWIJZE

1.2.1 Partijen

Een aantal partijen spelen een rol in dit afstudeerproces. In deze lijst worden deze mensen benoemd.

Student:

Flint Wardenaar

Bedrijfsbegeleiders:

Harry Visser (hoofdbegeleider)

Raymond Koehler (tweede begeleider)

Academische begeleiding:

Michiel Scager (afstudeerbegeleider en tweede examinator)

Hubert Schuit (eerste examinator)

Petra van Beek (afstudeercoördinator)

1.2.2 WERKUREN

De student werkt 40 uur per week, verdeeld over de vijf werkdagen. De student werkt vanuit huis op woensdagen. De student richt zich om van 9 tot 5 uur te werken. Deze tijden zijn echter redelijk flexibel. De student zou ook om 8 uur kunnen beginnen om zo eerder klaar te zijn.

1.2.3 Afspraken

Om het verloop van dit project te ondersteunen zijn de volgende afspraken gemaakt.

Voortgangsgesprek bedrijfsbegeleider

- **Wie:** Student, Bedrijfsbegeleider
- **Wanneer:** Elke donderdag 15:00
- **Waar:** Op kantoor
- **Waarom:** up-to-date houden bedrijfsbegeleider
- **Wat:** Een gesprek waarin de student een samenvatting geeft van zijn werkzaamheden van de afgelopen week en zijn plannen voor de aankomende week. Daarnaast is dit het moment voor het geven van feedback. Informeel is dit ook een moment om inhoudelijke zaken te bespreken.

Check-up gesprek Afstudeerbegeleider

- **Wie:** Student, Afstudeerbegeleider
- **Wanneer:** Elke week, dinsdag, 11:00
- **Waar:** Online, MS Teams
- **Waarom:** up-to-date houden afstudeerbegeleider
- **Wat:** Een gesprek waarin de student de leiding neemt om procesmatige en professionalisering gerelateerde zaken te bespreken. Vakinhoudelijke zaken zijn niet de prioriteit.

Leerteam meeting

- **Wie:** Student, Studentenleerteam
- **Wanneer:** Elke twee weken, Donderdag 14:00
- **Waar:** Online, MS-teams
- **Waarom:** mentale houvast bieden

- **Wat:** Een gesprek waarbij de studenten onderling zaken kunnen bespreken. Deze meeting is als informeel bedoeld en dient vooral als sociaal middel.

Status update mailtje

- **Wie:** Student, Afstudeerbegeleider
- **Wanneer:** Elke vrijdag
- **Waar:** Per e-mail
- **Waarom:** up-to-date houden afstudeerbegeleider en een logboek bijhouden
- **Wat:** De student maakt een beknopte samenvatting van zijn status. Hierbij gaat hij drie punten af: Inhoud, Proces en Persoonlijk.

2 PROJECTMANAGEMENT

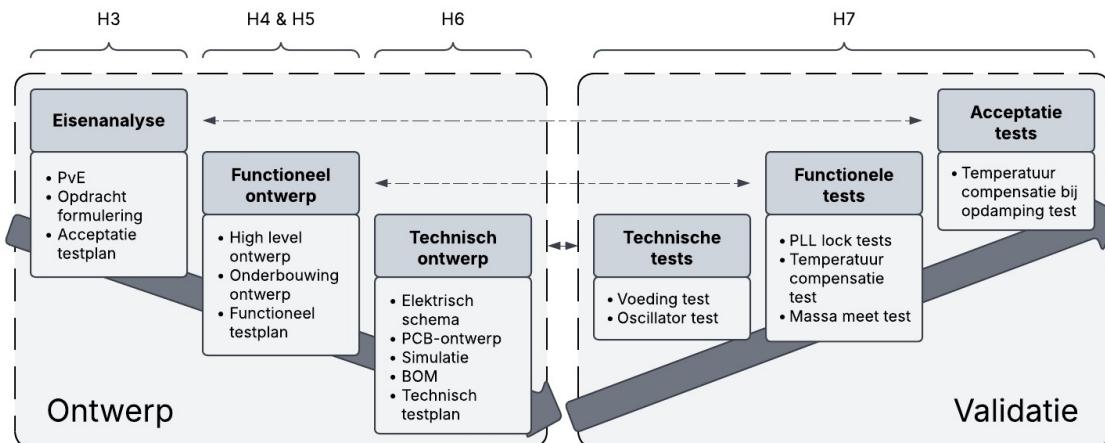
Dit hoofdstuk beschrijft hoe het ontwikkelproces van het systeem is gepland en aangestuurd. Er wordt uitgelegd welk ontwikkelmodel is gekozen en waarom, hoe deze methode is toegepast en hoe de planning is opgesteld en aangepast. Tot slot wordt de aanpak geëvalueerd.

2.1 V-MODEL

Voor dit project is gekozen voor het V-model als projectaanpak. Het V-model is een gestructureerde methode waarbij het ontwikkelproces wordt opgedeeld in twee hoofddelen: een aflopende reeks ontwerpfasen gevolgd door een oplopende reeks testfasen. Elke ontwerpstap aan de linkerzijde van de "V" correspondeert met een teststap aan de rechterzijde, gericht op validatie van het betreffende niveau (zie Figuur 2-1). Deze aanpak is voordelig in hardwareontwikkeling projecten, waarbij het vroegtijdig spotten van een fout veel tijd en geld kan scheelen. Daarnaast is deze methode bijzonder geschikt voor de ontwikkeling van een meetinstrument, omdat het gestructureerd testen bijdraagt aan de betrouwbaarheid van het product.

Het project werd opgedeeld in fasen. Eerst werden in oplopende mate van detail de verschillende ontwerp niveaus doorlopen, van gebruikerswensen tot het concrete printplaatontwerp. Na afronding van elke ontwerpfase werd een bijbehorend testplan opgesteld dat zou worden uitgevoerd tijdens de corresponderende testfase.

In het project initiatie document zijn mijlpalen gekoppeld aan elke fase (Wardenaar F., 2025). Door deze mijlpalen al in het begin vast te leggen, kon een realistische planning worden opgesteld en werd het verloop van het project beter beheersbaar.



Figuur 2-1: V-model

2.2 TOELICHTING FASEN EN MIJPALEN

Eisenanalyse [H3]:

De gebruikers wensen worden vertaald naar technische eisen

- **PvE:** Een eisenlijst waar de opdrachtgever mee in akkoord is gegaan
- **Opdracht formulering:** Een duidelijke formulering van de opdracht, goedgekeurd door de opdrachtgever

- **Acceptatie testplan:** Een testplan waarmee het systeem als geheel wordt getest a.d.h.v. de gestelde eisen

Functioneel ontwerp [H4 & H5]:

Door onderzoek uit te voeren wordt het systeem globaal ontworpen

- **HLD:** Een high level design, waarin het systeem tot op module niveau wordt beschreven
- **Onderbouwing ontwerp:** De belangrijke ontwerpkeuzes worden in een document benoemd en onderbouwd
- **Functioneel testplan:** Een testplan om losse functies van het ontwerp te testen

Technisch ontwerp [H6]:

De verschillende onderdelen worden volledig uitgewerkt

- **Elektrisch schema:** Een schema waarin het elektrisch ontwerp in detail wordt beschreven
- **Simulatie:** Een simulatie van de te realiseren modules, om te bewijzen dat deze dienen te werken
- **Pcb-ontwerp:** Een digitaal ontwerp van een printplaat in een programma zoals KiCad
- **BOM:** Een lijst waarin alle gebruikte, en daarmee de te bestellen, componenten zijn aangegeven
- **Technisch testplan:** Een testplan om op module niveau te testen

Technische tests [H7]:

De gerealiseerde modules worden getest

- **Voeding test:** Een test waarin de voedingslijnen worden gemeten of ze de juiste spanning bieden en of er geen overmatige stromen lopen
- **Oscillator test:** Een test waarin de werking van de spanningsgestuurde oscillatoren worden beproefd.

Functionele tests [H7]:

Losse functionaliteiten van het systeem worden getest

- **Temperatuurcompensatietest:** Een test waarbij de temperatuur meet eigenschap van het systeem wordt beproefd
- **Massameettest:** Een test waarbij de massa wordt gemeten zonder temperatuur compensatie met de oorspronkelijke software

Acceptatie tests [H7]:

Het systeem wordt als geheel getest a.d.h.v. de gestelde eisen

- **Temperatuur compensatie bij opdamping test:** Een test die het systeem beproefd op het compenseren voor het opwarmen van het kristal in een realistisch opdamp scenario

2.2.1 Aanpassingen ten opzichte van PID

Gedurende het project zijn enkele aanpassingen doorgevoerd ten opzichte van het oorspronkelijke project initiatie document (Wardenaar F., 2025).

Softwareontwikkeling vervallen

De geplande softwareontwikkeling is geschrapt vanwege tijdsgebrek. Dit onderdeel was niet essentieel voor de opdracht, maar zou het testen vereenvoudigen en de demo verbeteren. Het werd beschouwd als een ‘nice to have’.

Realisatiefase vervallen

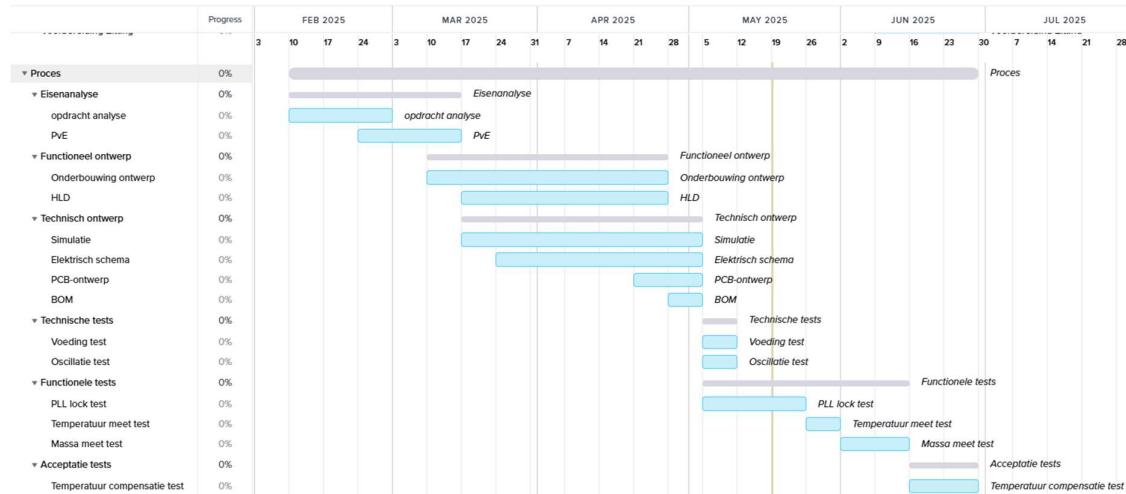
De realisatiefase is komen te vervallen, omdat het ontwerpen van de PCB en het samenstellen van de componentenlijst logischer binnen de technische ontwerp fase pasten. Het assembleren van de PCB – de enige activiteit die typisch in de realisatiefase valt – is uiteindelijk uitgevoerd door een collega, wegens tijdsgebrek.

Aanpassingen in testfasen door gewijzigd ontwerp

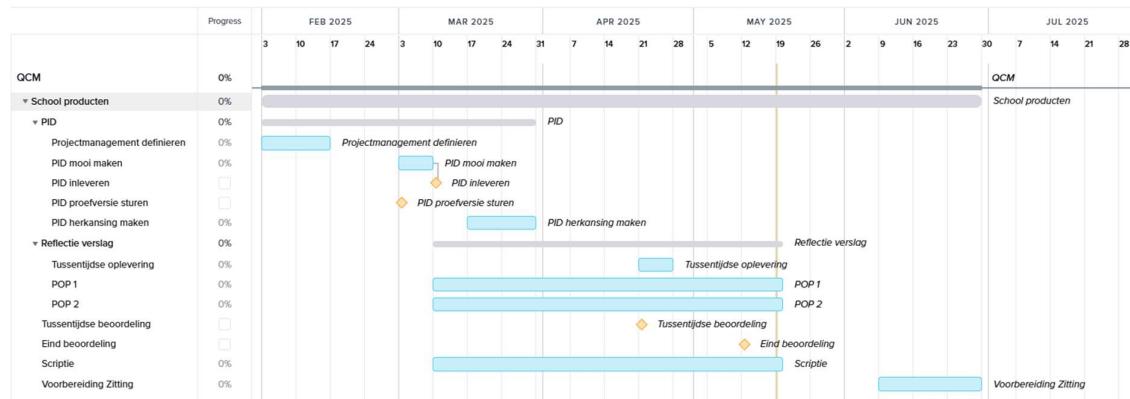
Door het overschakelen van een dual-oscillator naar een PLL-ontwerp zijn de technische testplannen aangepast. Bovendien is de PLL lock test toegevoegd aan de functionele testfase.

2.3 STROKENPLANNING V2

Voor dit project is gebruikgemaakt van een strokenplanning om overzicht te houden van de tijdverdeling over de verschillende fasen en mijlpalen. In Figuur 2-2 is de planning te zien voor het inhoudelijke deel van het project. In Figuur 2-3 is de planning te zien waar de schoolproducten staan ingepland. Voor deze planning werd een online tool gebruikt (app.teamgantt.com). De planning werd initieel opgesteld aan de hand van de, in het PID geformuleerde, fasen en mijlpalen. Tijdens het project diende de strokenplanning als leidraad om voortgang te bewaken en tijdig bij te sturen wanneer vertragingen optreden, bijvoorbeeld door de keuze om van ontwerp te veranderen.



Figuur 2-2: Strokenplanning Inhoudelijk V2 (vergroot in bijlage C)



Figuur 2-3: Strokenplanning Schoolproducten V2 (vergroot in bijlage D)

2.3.1 Aanpassingen ten opzichte van V1

De planning is tijdens het project meerdere malen aangepast ten opzichte van de versie in het PID (zie bijlage B). De belangrijkste oorzaak was de vertraging door het wijzigen van de ontwerp richting en het moeten herkansen van het PID. Hierdoor verdwenen of veranderden sommige mijlpalen, en werd besloten het softwareonderdeel te laten vervallen.

Na ruim een maand gewerkt te hebben aan de initiële richting, moest teruggeschakeld worden naar de functionele ontwerpfase. Dit zorgde ervoor dat er aanzienlijk minder tijd overbleef voor het testen en valideren. Daardoor zou het project alleen volledig afgerond kunnen worden voor de deadline van het eindverslag (19 mei) als alle tests in één keer zouden slagen — wat niet realistisch is.

Daarnaast duurde het ontwerpen van de PCB een week langer dan gepland, wat extra ten koste ging van de testtijd.

2.4 EVALUATIE

Het V-model bleek een geschikte keuze voor dit project. De gefaseerde aanpak sloot goed aan bij de gestructureerde aard van hardwareontwikkeling. Vooral het vooraf definiëren van tests heeft bijgedragen aan overzichtelijke en doelgerichte validatiefasen. Tijdens het project werd de planning over het algemeen goed bijgehouden en bleef er voldoende overzicht over de voortgang. Het gestructureerd en fasegewijs werken volgens het V-model werkte prettig en gaf houvast.

Toch zijn er ook punten waarop verbetering mogelijk is. In de beginfase is er relatief weinig tijd besteed aan het uitdenken van mijlpalen. Hierdoor ontbrak het overzicht oorspronkelijk. Bij de herkansing van het PID is dit verbeterd door hier meer aandacht aan te besteden (Wardenaar F., 2025). Ook zijn er geen tijdinschattingen gemaakt per mijpaal, wat het achteraf lastig maakte om te reflecteren op de planning ten opzichte van de daadwerkelijke tijdsbesteding. In een volgend project zou dit beter meegenomen kunnen worden. Daarnaast zou het plannen van een kleine buffer bij elke mijpaal verstandig zijn, om eventuele vertraging op te vangen zonder direct in de knel te komen met de rest van de planning.

3 OPDRACHT

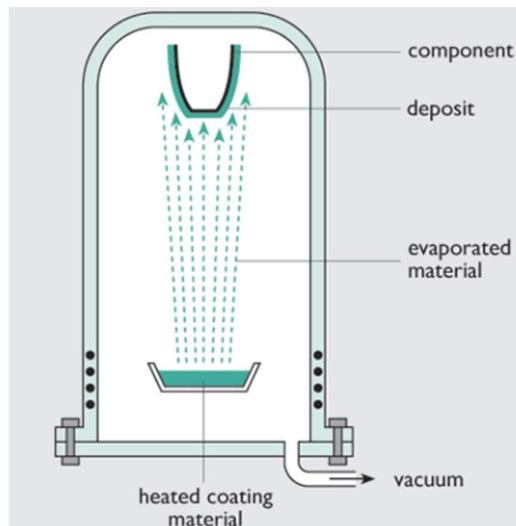
Dit hoofdstuk beschrijft de fase “eisenanalyse” (zie H2) en is grotendeel overgenomen uit het project initiatie document (Wardenaar F., 2025). De mijlpalen van deze fase, het PvE, de opdrachtformulering en het acceptatie testplan zijn allen behaald.

3.1 CONTEXT

Om de opdracht te kunnen begrijpen is het van belang om de context te weten. Hier zal de context worden geschetst.

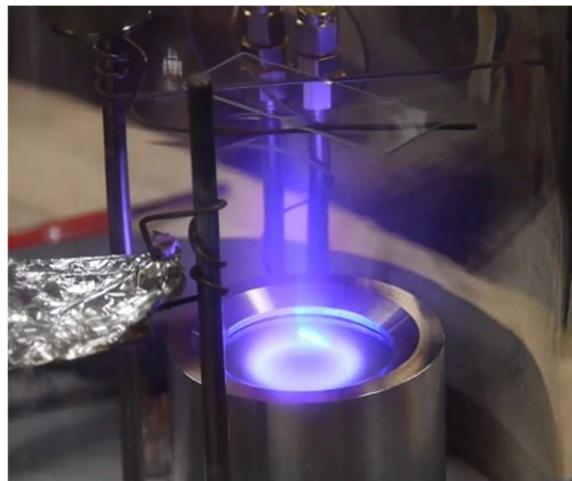
3.1.1 Opdampen/sputteren

De opdrachtgever is een wetenschapper bij het LION die in bezit is van meerdere opdamp- en sputteropstellingen (ongeveer vijf in totaal). Opdampen is een techniek waarbij een materiaal in een hoog vacuüm wordt verhit, bijvoorbeeld met een gloeidraad of een elektronenstraal. Dit proces wordt ook wel “Physical vapor deposition” of PVD genoemd. Zodra het materiaal een voldoende hoge temperatuur bereikt, verdampst het en condenseert het op oppervlakken binnen de vacuümkamer. Hiermee kunnen dunne lagen materiaal met grote precisie worden aangebracht.



Figuur 3-1: Diagram van een standaard PVD-opstelling(Bellardita et al., 2019)

Sputteren is een alternatieve methode om een vergelijkbaar resultaat te bereiken, maar maakt gebruik van geïoniseerd gas als energiebron. Door botsingen tussen de ionen en het doelmateriaal worden atomen losgeslagen, die zich vervolgens afzetten als een dunne laag op een substraat. Beide technieken worden veel toegepast in onderzoek en industrie om materialen met gecontroleerde eigenschappen te creëren.

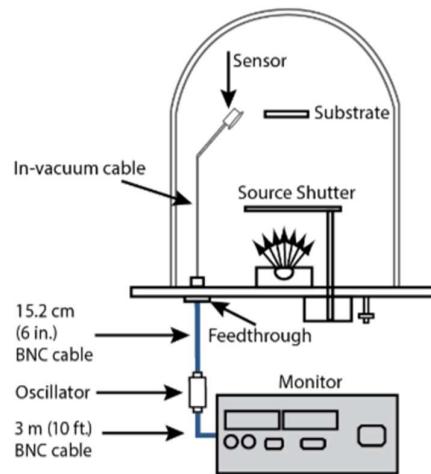


Figuur 3-2: Sputter-opstelling waarin een microscoop-slide wordt gecoat met koper (Krasnow B., 2013)

3.1.2 QCM

Om de dikte van de opgedampte laag nauwkeurig te monitoren, wordt een Quartz Crystal Microbalance (QCM) gebruikt. Dit is een oscillerend kwartskristal dat in contact staat met de damp in de vacuüm kamer. Wanneer materiaal op het kristal neerslaat, neemt de massa van het kristal toe, wat resulteert in een meetbare verlaging van de resonantiefrequentie.

Het diagram in Figuur 3-3 (INFICON, 2021) laat zien hoe een typisch QCM-systeem er uit ziet. Het systeem is op te delen in drie modules: De sensor, de oscillator en de frequentieteller.



Figuur 3-3: Diagram commercieel QCM-systeem (INFICON, 2021)

De relatie tussen de massa- en de frequentieverandering wordt beschreven door de Sauerbrey-vergelijking (Sauerbrey, 1959):

$$\Delta m = \frac{-C}{n} \cdot \Delta f \quad [3.a]$$

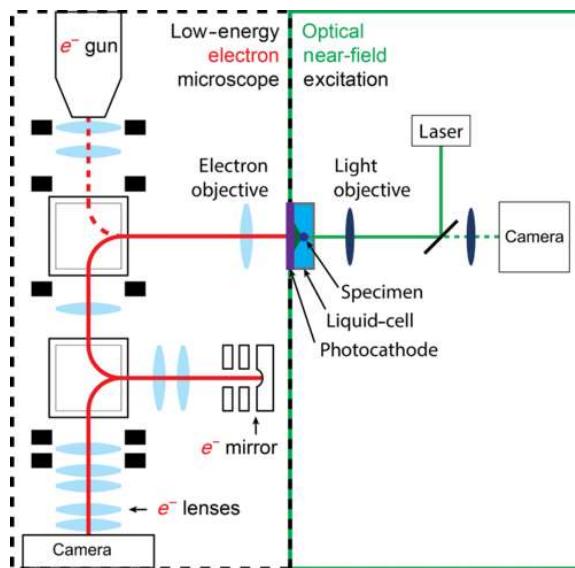
Waarbij Δm de massaverandering is, C een constante is die afhankelijk is van de kristaleigenschappen en temperatuur, n de gebruikte harmonische mode van het kristal is en Δf de frequentieverandering is.

Hieruit blijkt een lineair verband tussen de massa-afname en de frequentieverandering. Dit maakt QCM een essentieel instrument voor het nauwkeurig controleren van opdamp- en sputterprocessen.

3.1.3 ONEM

De opdrachtgever verricht onderzoek naar Optical-nearfield-electron-microscopy (ONEM). Dit is een nieuwe microscopietechniek die een veel hogere vergroting biedt dan een optische microscoop, zonder schade toe te brengen aan gevoelige biologische samples(Marchand et al., 2021). De resolutie van een klassieke optische microscoop wordt beperkt door de relatief grote golflengte van licht, waardoor details kleiner dan 0,2 μm niet zichtbaar zijn. Deze beperking, bekend als de diffractielimiet (Alvelid et al., 2019) geldt echter alleen wanneer een object van een afstand groter dan één golflengte wordt waargenomen.

ONEM maakt gebruik van dit principe door het licht kort na interactie met de sample om te zetten in een elektronenbundel. Dit wordt bereikt door een fotokathode op de monsterhouder aan te brengen. Deze laag bevat zwak gebonden elektronen die, wanneer ze door licht worden geraakt, vrijkomen. De gegenereerde elektronen worden vervolgens gedetecteerd met een low-energy-electron-microscope (LEEM) (Figuur 3-4).



Figuur 3-4: Functioneel schema ONEM (Marchand et al., 2021)

3.2 PROBLEEMSTELLING

Bij ONEM speelt het opdampen van materialen een cruciale rol. De fotokathode bestaat uit een extreem dunne laag cesium, zo'n 5nm of 187 atomen dik, waardoor minimale variaties in de laagdikte al grote invloed kunnen hebben op de prestaties. Momenteel wordt slechts een fractie van de verwachte vrije elektronen waargenomen in vergelijking met theoretische modellen. Een van de mogelijke oorzaken van deze afwijking is een onnauwkeurigheid bij het opdampen van de fotokathode.

Deze onnauwkeurigheid stamt uit het feit dat het sensor kristal opwarmt tijdens het opdampproces. Door deze opwarming verhoogt de eigenfrequentie van het kristal. Dit effect zorgt voor een fout in de gemeten opdampdikte. Deze fout is bij alle opdampopstellingen

aanwezig, maar omdat de toleranties daar zo klein zijn, vormt dit een limitatie in het onderzoek naar ONEM.

3.3 OPDRACHTFORMULERING

De opdracht luidt als volgt:

“Ontwikkel en test een Quartz-Crystal-Microbalance PoC, voor het nauwkeurig meten van opgedampte laagdikten, waarbij gecompenseerd wordt voor het opwarmen van de sensor”

3.4 PvE – MoSCoW

In overleg met de opdrachtgever is de volgende eisenlijst tot stand gekomen.

Tabel 3-1: PvE - MoSCoW

Nr.	Eis	Toelichting
1	Must haves	Essentieel voor een succesvol project
1.1	De gemeten waarden zijn met minder dan 0.2ppm/°C afhankelijk van de temperatuur van het kristal	Het ongecompenseerde kristal heeft een afhankelijkheid van ongeveer 2ppm/°C tussen 20 en 100 °C (uit eigen metingen in Error! Reference source not found.). Een tienvoud verbetering wordt ingeschat als een haalbaar en wenselijk doel.
1.2	De gestelde eisen worden behaald bij kristal temperatuur van 20 t/m 100 °C	Bij een zware thermische belasting van het kristal is de temperatuur niet hoger dan 90°C geworden (zie Error! Reference source not found.). Deze waarde is omhoog afgerond.
2	Should haves	Gewenst, maar niet strikt noodzakelijk
2.1	Het systeem heeft een meetinterval van maximaal 100ms	De opdampregelaar heeft snelle feedback nodig
2.2	Het systeem behaalt een meetresolutie van 0.01nm	De gewenste opdampsnelheid is 0.10nm/s. door de 100ms meetinterval zal de resolutie een tiende hiervan moeten zijn.
2.3	Het kristal en de aangesloten kabels zijn geschikt voor UHV	Ze mogen geen gassen uitzetten die het vacuüm degradeert
2.4	Het systeem stuurt zijn metingen door naar een PC	De computer die de opdampsnelheid regelt gebruikt deze data als feedback
2.5	De enige elektrische toegang tot het vacuüm is via één BNC-connector	De huidige opstelling gebruikt deze connector
2.6	Het maximale frequentieverloop als gevolg van opgedampte massa, voordat het kristal vervangen dient te worden is 5%	De kristallen hebben een bepaalde levensduur voordat ze vervangen dienen te worden. Bij een dikke laag opgedampt materiaal zal dit mechanische invloed hebben op

		het kristal. Onder de 5% is de verhouding tussen laagdikte en frequentie nagenoeg lineair (Wajid, 1997)
3	Could haves	Optioneel, Alleen als hier tijd voor is
3.1	Het kristal past in de substraathouder van de LEEM met een binnendiameter van 8mm	De momenteel gebruikte kristallen zijn te groot hiervoor met een diameter van 12mm
3.2	Er zit 40cm unshielded kabel tussen de oscillator en het kristal	De kabels naar de substraathouder binnen in de LEEM zijn niet shielded
4	Wont haves	Buiten scope van dit project
4.1	De frequentieteller wordt zelf ontwikkeld	Deze zijn off-the-shelf beschikbaar
4.2	Het kristal wordt zelf ontwikkeld	Deze zijn off-the-shelf beschikbaar
4.3	Het systeem compenseert voor de mechanische eigenschappen van het opgedampte materiaal (Z-factor)	Mechanische eigenschappen worden pas significant nadat er grote hoeveelheden zijn opgedampt(Wajid, 1997)

3.5 PRODUCTEN

Tijdens het afstudeertraject worden verschillende producten opgeleverd die zowel het ontwikkelproces als het eindresultaat documenteren en ondersteunen. Deze producten zijn onderverdeeld in drie categorieën:

1. Documentatie

De documentatie omvat een technisch verslag van het project. Dit is een gecondenseerde versie van de eindscriptie met als doel om het project overdraagbaar te maken.

2. Proof of Concept (PoC)

Het centrale resultaat van dit project is een werkend prototype: een hardwarematig gerealiseerd QCM-systeem met temperatuurcompensatie. De focus ligt tijdens het afstuderen op het opleveren van de hardware. De bijbehorende software, waarmee bijvoorbeeld de kalibratie en uitlezing geautomatiseerd kunnen worden, zal na inlevering van de scriptie verder worden ontwikkeld.

3. Schoolproducten

In het kader van de opleiding worden daarnaast een aantal verplichte documenten opgeleverd. Dit betreft het Project Initiatie Document (PID), waarin het projectvoorstel en de aanpak zijn vastgelegd, de scriptie zelf als hoofdrapportage van het afstudeerwerk, een verslag van het professioneel functioneren, twee feedback formulieren en een eindpresentatie. De presentatie wordt verzorgd na het inleveren van de scriptie.

Deze producten vormen gezamenlijk het bewijs van de ontwikkeling, uitvoering en reflectie binnen het afstudeerproject.

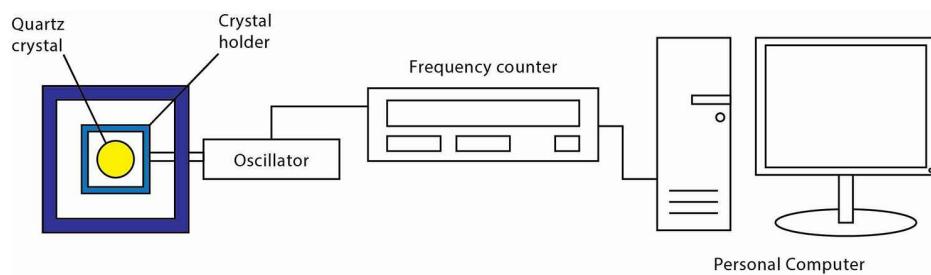
4 SAMENVATTING ONDERZOEK PID

Dit hoofdstuk vat het onderzoek uit het PID samen. Meer detail is te vinden in Hoofdstuk 3 van het PID (Wardenaar F., 2025). Dit hoofdstuk vormt het eerste deel van de fase functioneel ontwerp.

De vijf deelvragen gaan over de werking van bestaande QCM-systemen, de oorzaken en gevolgen van opwarming van het kristal, hoe warm het kristal wordt, en hoe hiervoor gecompenseerd kan worden.

4.1 HOE WERKEN BESTAANDE QCM-SYSTEMEN

QCM-systemen bestaan uit drie hoofddelen: het kristal (sensor), een oscillator en een frequentieteller (Figuur 4-1).



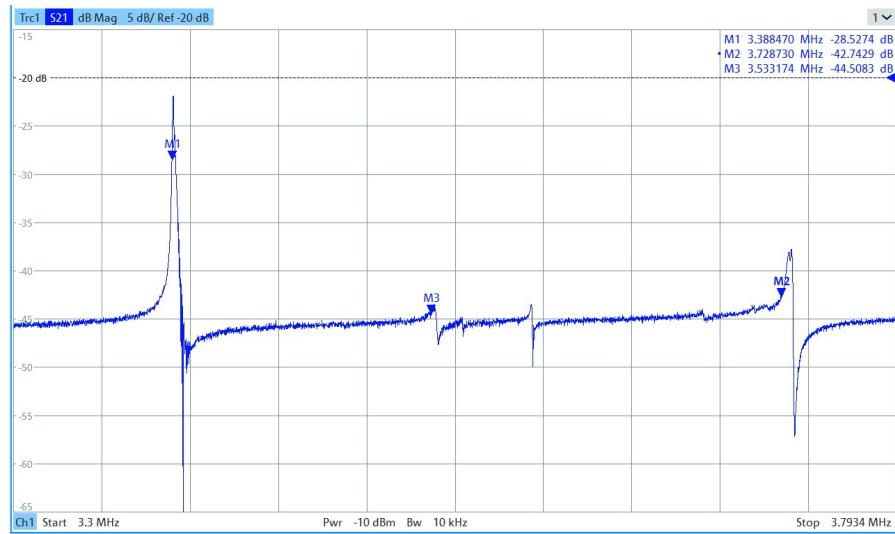
Figuur 4-1: Typische QCM-opstelling (Nanoscience, n.d.)

4.1.1 Kwarts kristal

Dankzij het piezo-elektrisch effect kan een kwarts kristal zowel vervormen door elektrische spanning als zelf spanning opwekken bij vervorming. Voor QCM-toepassingen worden dunne schijfvormige kristallen met een diameter van ca. 12 mm gebruikt, met een basisfrequentie van 5 of 6 MHz. Deze kristallen hebben een hoge Q-factor, wat zorgt voor een stabiele frequentie.

De oscillatiefrequentie van het kristal is lineair gerelateerd aan zijn massa, waardoor massa- en laagdiktemetingen mogelijk worden. Een belangrijke parameter is de snede van het kristal (zoals AT-cut of SC-cut), die invloed heeft op temperatuurgevoeligheid en mechanische stabiliteit. SC-cut kristallen kunnen naast de fundamentele C-mode en spurious-modes, ook in B-mode oscilleren.

De B-mode ligt doorgaans ~10% boven de eerste harmonische en is vooral van belang in toepassingen waar temperatuurcompensatie gewenst is. Praktijkmetingen met een netwerkanalyser bevestigen het bestaan van deze modi (Figuur 4-2). Tot slot wordt het fysieke ontwerp van het kristal en zijnhouder besproken, inclusief de elektrodestructuur en de toepassing van waterkoeling om temperatuurinvloeden te minimaliseren.



Figuur 4-2: Schermafbeelding van de netwerk analyseer aangesloten op een 3.3MHz SC-cut kristal (M1: C-mode, M2: B-mode, M3: Spurious mode)

Het kristal is voorzien van twee elektroden en wordt in eenhouder geplaatst die het kristal aan de randen klemt (zie Figuur 4-3). Eén elektrode maakt contact met de **geaarde** houder, terwijl de andere via een veercontact verbonden is met een kabel die naar de oscillator leidt. De houder van het kristal is voorzien van waterkoeling.



Figuur 4-3: Commerciële QCM sensor met waterkoeling - De gouden cirkel is het kristal (Front Load Single Sensor, n.d.)

4.1.2 Oscillator

De oscillator drijft het kristal aan door het gegenereerde signaal te versterken en terug te koppelen. Door filters toe te passen kan men specifieke oscillatiemodi selecteren. Een banddoorlaatfilter op de gewenste frequentie zorgt ervoor dat alleen deze mode wordt versterkt, terwijl andere onderdrukt worden. Door te filteren op een hogere harmonische kan men hogere frequenties behalen.

4.1.3 Frequentieteller

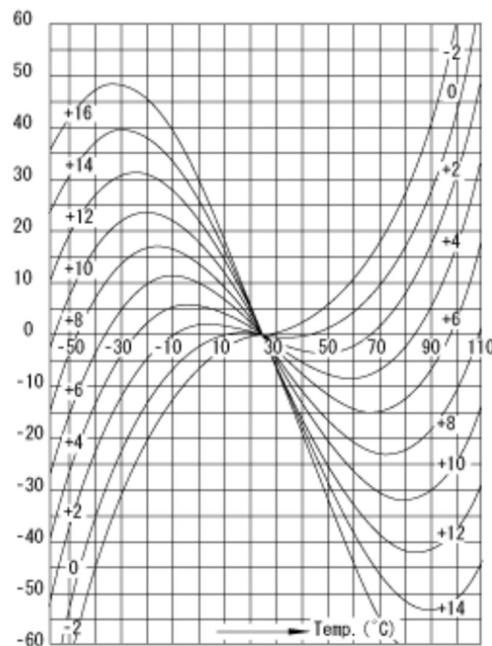
Een frequentieteller meet de frequentie van het oscillatiesignaal met hoge nauwkeurigheid. Binnen de huidige opstellingen binnen de Universiteit Leiden wordt hiervoor een Keysight 53220A gebruikt, die frequenties meet tot op 11 decimalen nauwkeurig, met een meetinterval van 100 ms. De gemeten waarden worden vervolgens doorgestuurd naar een computer voor verdere verwerking.

4.2 WAARDOOR WARMT HET KRISTAL OP?

In een vacuüm is warmteafvoer lastig. Van drie mogelijke warmtebronnen (opgedampt materiaal, mechanische wrijving, en warmtestraling) blijkt stralingswarmte van het hete bronmateriaal de enige significante oorzaak van opwarming. De andere bronnen zijn verwaarloosbaar.

4.3 WAT IS HET EFFECT VAN WARMTE OP HET KRISTAL?

Uit literatuur blijkt dat de relatie tussen temperatuur en resonante frequentie van een kwarts kristal typisch een S-curve volgt, oftewel een derdegraads polynoom. Voor AT-cut kristallen is het temperatuurstabiele punt rond kamertemperatuur gekozen, terwijl dit bij SC-cut kristallen rond de 80°C ligt. De precieze temperatuurrespons blijkt sterk afhankelijk van de snijhoek van het kristal, wat zichtbaar is in Figuur 4-4. Deze karakteristiek is experimenteel gevalideerd.



Figuur 4-4: Temperatuurrespons AT-cut kristal, uit literatuur (y = frequentieverandering in ppm, x = temperatuur in graden C, de verschillende curves geven verschillende snijhoeken aan in hoekminuten)

4.4 HOE WARM WORDT HET KRISTAL?

Een experiment met opdampen van niobium toonde aan dat het kristal maximaal tot ongeveer 90°C opwarmde. Dit werd indirect afgeleid uit de frequentieverschuiving na het opdampen. Hoewel de meting onnauwkeurig was, geeft het een indicatie van het maximale temperatuurbereik.

4.5 HOE KAN TEMPERATUUR HET BEST GECOMPENSEERD WORDEN?

Voor temperatuurcompensatie in een QCM-systeem zijn drie benaderingen overwogen. De eerste methode betrof het gebruik van een infraroodsensor (IR-sensor) die achter het kristal wordt geplaatst om de temperatuur non-contact te meten. Hoewel dit conceptueel aantrekkelijk is, bleek het technisch uitdagend in de praktijk, vooral vanwege de moeilijkheid om een betrouwbare meting uit te voeren in een vacuümomgeving.

Een tweede methode maakte gebruik van een thermokoppel dat werd geplaatst op een dummy-kristal naast het actieve kristal. Deze opstelling had als voordeel dat het temperatuurgedrag van een fysiek vergelijkbaar kristal werd gemeten zonder het daadwerkelijke meetsignaal te beïnvloeden. Echter, deze methode introduceert onnauwkeurigheden: de toevoeging van een thermokoppel aan het kristal wat zelf maar een paar milligram weegt, zal de thermische eigenschappen significant beïnvloeden. Daarbij komt ook nog kijken dat de gemeten temperatuur altijd achter zal lopen op de daadwerkelijke kristaltemperatuur.

De derde en meest veelbelovende methode is dual-mode compensatie. Hierbij wordt het kristal zelf gebruikt als temperatuursensor door twee verschillende oscillatiemodi tegelijk te meten (Song et al., 2024). Doordat deze modi elk een andere gevoeligheid hebben voor temperatuurveranderingen, kan de massametingen hiervoor worden gecorrigeerd.

Deze dual-mode methode vereist geen extra sensoren of bedrading binnen de vacuümkamer, en kan daarom makkelijk worden toegepast op bestaande systemen. Het compensatieprincipe is experimenteel gevalideerd binnen dit project. Op basis van deze bevindingen is besloten deze aanpak te implementeren in het uiteindelijke ontwerp.

5 FUNCTIONEEL ONTWERP

Dit hoofdstuk behandelt het tweede deel van de functioneel ontwerpfase. In deze fase zijn belangrijke mijlpalen gerealiseerd, waaronder het high-level ontwerp, de onderbouwing van ontwerpkeuzes en het opstellen van het functioneel testplan. Het high-level ontwerp en het voorafgaande onderzoek worden in dit hoofdstuk toegelicht; het testplan is te vinden in paragraaf 7.1.2.

5.1 WAT IS DE GEWENSTE FREQUENTIEMEETRESOLUTIE?

In punt 2.2 van het PvE staat dat het systeem een laagdikte van 0.01nm moet kunnen onderscheiden. De Sauerbrey-vergelijking 4.a (Sauerbrey, 1959) geeft de verhouding tussen de frequentieverandering van de resonante mode ten gevolge van een verandering in massa.

$$\Delta f = \frac{2f_0}{A\sqrt{\rho_q \mu_q}} \cdot \Delta m \quad [4.a]$$

Hierbij is Δf de verandering van de frequentie, Δm de verandering van de massa, f_0 de startfrequentie, A is het oppervlakte, ρ_q de dichtheid en μ_q de shear-modulus van het kwarts kristal.

Vergelijking 4.b geeft de verhouding tussen verschil in massa en laagdikte d . Waarbij ρ_m de dichtheid van de opgedampte massa representeert

$$\Delta m = \Delta d \cdot A \rho_m \quad [4.b]$$

Vergelijking 4.c combineert de vorige vergelijkingen. Opmerkelijk is dat het oppervlakte van het kristal niet meer een factor is.

$$\Delta f = \frac{\Delta d \cdot 2f_0 \rho_m}{\sqrt{\rho_q \mu_q}} \quad [4.c]$$

Uit deze vergelijking is te constateren dat bij het opdampen van 0.01nm aluminium, gekozen als worst case, de fundamentele mode van 3.3MHz met 1.3Hz zal verlagen.

Om te voldoen aan de should-have die stelt dat er 0.01nm meetresolutie behaalt dient te worden, is een frequentiemeetresolutie van afgerond 1Hz vereist.

5.2 WELKE MODI ZIJN HET BESTE GESCHIKT VOOR TEMPERATUUR COMPENSATIE?

Kwarts kristallen hebben verschillende resonante modi. Deze modi hebben allen een unieke temperatuur-frequentie (T-f) karakteristiek. Er is onderzocht welke twee modi het meest geschikt zijn om voor de temperatuur te compenseren.

Beoordelingscriteria

Bij het selecteren van geschikte modi voor temperatuurcompensatie zijn twee eigenschappen van belang, afhankelijk van de toepassing. Voor het behalen van de hoogste nauwkeurigheid moeten de twee modi de volgende eigenschappen hebben: De zogenaamde mass-mode vereist een zo laag mogelijke temperatuurafhankelijkheid en is dus voornamelijk beïnvloed door de opgedampte massa, terwijl de temperature-mode juist een hoge temperatuurafhankelijkheid vereist.

Daarnaast is het belangrijk dat het verschil in temperatuurrespons tussen de gekozen modi een monotone karakteristiek vertoont binnen het temperatuurbereik van 20 °C tot 100 °C. Dat wil zeggen dat de karakteristieke lijn altijd stijgt of daalt. Een monotone relatie voorkomt ambiguïteit bij het afleiden van temperatuur uit frequentieverchillen, omdat elke frequentieverandering overeenkomt met slechts één temperatuurverandering.

Beschikbare modi

Voor het ontwerp zijn verschillende resonantiemodi van het SC-cut kristal onderzocht. De volgende modi kwamen hierbij naar voren:

- **C-mode 1e orde (~6 MHz)**
- **C-mode 3e orde (~18 MHz)**
- **B-mode 1e orde (~6,7 MHz)**
- **B-mode 3e orde (~20 MHz)**
- **Spurious/anharmonische modi (~6,3 MHz)**

Onderzoeks methode

Voor het karakteriseren van de modi is het kristal aangesloten op een network-analyzer (NA). Door een sweep uit te voeren over een frequentiegebied, worden de resonantiemodi zichtbaar als versterkingspieken.

Het kristal wordt vervolgens stapsgewijs verwarmd met behulp van een hot-plate. Een thermokoppel is bevestigd aan de behuizing van het kristal om de temperatuur te meten. Bij elke temperatuurstap wordt de resonantiefrequentie van elke zichtbare mode vastgelegd. Hierbij wordt genoeg tijd geboden voor het kristal om op temperatuur te komen.

Op basis van deze metingen worden T-f karakteristieken opgesteld voor elke mode.

Resultaten

De gemeten temperatuurcoëfficiënten en karakteristieken zijn als volgt:

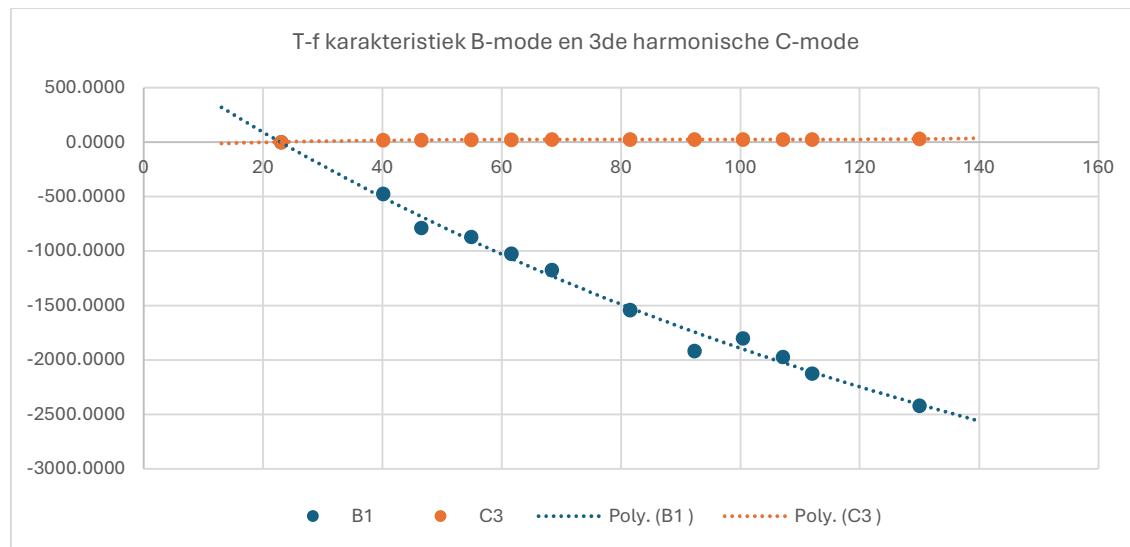
- C-mode 1e orde (~6 MHz):
Temperatuurcoëfficiënt: -6,5 Hz/K
Gedrag: monotoon dalend
- C-mode 3e orde (~18 MHz):
Temperatuurcoëfficiënt: +2,7 Hz/K
Gedrag: niet-monotoon
- B-mode 1e orde (~6,7 MHz):
Temperatuurcoëfficiënt: -84 Hz/K
Gedrag: monotoon dalend
- B-mode 3e orde (~20 MHz):
Resonantie: te zwak voor betrouwbare meting met de NA
- Spurious/anharmonische modi (~6,3 MHz):
Resonantie: te zwak voor betrouwbare meting met de NA

Conclusie

Op basis van de gemeten karakteristieken is de volgende combinatie het meest geschikt voor temperatuurcompensatie:

- Voor de mass-mode is C-mode 3e orde het meest vanwege de lage absolute drift.
- Voor de temperature-mode is B-mode 1e orde het meest geschikt, dankzij de sterke en monotone temperatuurafhankelijkheid.

Figuur 5-1 toont de karakteristieken van deze modi. Het verschil in frequentie tussen deze twee modi vertoont een monotone T-f karakteristiek over het relevante temperatuurbereik (20 °C – 100 °C), wat deze combinatie bruikbaar maakt voor temperatuurcompensatie op basis van frequentieverzillen.



Figuur 5-1: Test resultaten T-f karakteristiek B1-mode en C3-mode (x = temperatuur [°C], y = afwijking frequentie [ppm])

5.3 HOE KAN BIJ EEN DUAL-MODE SYSTEEM DE TEMPERATUURGECOMPENSEERDE WAARDE BEREKEND WORDEN?

In een dual-mode QCM-systeem worden twee resonantiemodi van hetzelfde kristal gelijktijdig gebruikt: de mass-mode en de temperature-mode. Door beide frequentieverzchuivingen met elkaar te combineren, is het mogelijk om het temperatuureffect weg te filteren en enkel de massa-gerelateerde frequentieverzchuiving te behouden (Song et al., 2024).

De relatie tussen de frequentie, massa- en temperatuursverandering voor de mass- en temperature-modi wordt wiskundig weergegeven in vergelijking 5.a en 5.b respectievelijk:

$$\Delta f_M = \lambda_{M_3} \cdot \Delta T^3 + \lambda_{M_2} \cdot \Delta T^2 + \lambda_{M_1} \cdot \Delta T + \lambda_{M_0} \cdot \Delta m \quad [5.a]$$

$$\Delta f_T = \lambda_{T_3} \cdot \Delta T^3 + \lambda_{T_2} \cdot \Delta T^2 + \lambda_{T_1} \cdot \Delta T + \lambda_{T_0} \cdot \Delta m \quad [5.b]$$

In deze vergelijkingen zijn de λ -waarden constante coëfficiënten die de karakteristiek van het kristal in de gebruikte modi beschrijven. Δf_M en Δf_T zijn de gemeten frequentieverzchuivingen van respectievelijk de mass-mode en de temperature-mode. ΔT is de verandering in temperatuur, en Δm is de verandering van de massa van het kristal.

Te zien is dat elke frequentie afhankelijk is van twee variabelen: de massa en de temperatuur

Kalibratie

Om deze methode toe te kunnen passen, moeten de coëfficiënten vooraf bepaald worden via kalibratie. Voor het bepalen van λ_1 , λ_2 , en λ_3 wordt het kristal in een oven geplaatst, waarbij de temperatuur gecontroleerd wordt verhoogd. Tegelijkertijd worden de frequenties van beide resonantiemodi gemeten. Op de meetdata wordt een derdegraads polynoom gefit, waarbij de coëfficiënten direct worden afgeleid. De constante term van de polynoom vervalt, aangezien de berekening enkel op de veranderingen in frequentie betrekking heeft.

De coëfficiënt λ_0 , die de massa-afhankelijkheid beschrijft, kan afzonderlijk worden bepaald of afgeleid uit eerder geformuleerde massa-frequentierelaties, zoals in vergelijking 4.a.

Metingen

Bij metingen wordt gebruikgemaakt van het verschil tussen de twee frequentiemetingen, $\Delta f_m - \Delta f_t$. Deze combinatie levert een vergelijking (vergelijking 5.c) waarin de massa-afhankelijkheid wegvalt en alleen temperatuurafhankelijkheid overblijft. Door deze vergelijking op te lossen, wordt de temperatuurverandering ΔT bepaald.

$$\begin{aligned} \Delta T^3 + \frac{(\lambda_{M_2} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_2} \cdot \lambda_{M_0})}{(\lambda_{M_3} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_3} \cdot \lambda_{M_0})} \cdot \Delta T^2 + \frac{(\lambda_{M_1} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_1} \cdot \lambda_{M_0})}{(\lambda_{M_3} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_3} \cdot \lambda_{M_0})} \cdot \Delta T \\ + \frac{\lambda_{M_0}}{(\lambda_{M_3} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_3} \cdot \lambda_{M_0})} \cdot \Delta f_T + \frac{-\lambda_{T_0}}{(\lambda_{M_3} \cdot \lambda_{T_0} - \lambda_{T_3} \cdot \lambda_{M_0})} \cdot \Delta f_M = 0 \end{aligned} \quad [5.c]$$

Tot slot wordt deze ΔT teruggevoerd in vergelijking 5.d, waarin enkel de massaterm behouden blijft. Op deze manier kan de massa die op het kristaloppervlak is afgezet worden bepaald, onafhankelijk van temperatuurfluctuaties.

$$\Delta m = \frac{\Delta f_m - (\lambda_{M_3} \cdot \Delta T^3 + \lambda_{M_2} \cdot \Delta T^2 + \lambda_{M_1} \cdot \Delta T)}{\lambda_{M_0}} \quad [5.d]$$

Rekentijd

Het oplossen van derdegraads polynomen kost relatief veel computerkracht. Omdat de meetwaarden tijdsgevoelig zijn, moet hier rekening mee gehouden worden bij het kiezen van de processing module. In dit ontwerp zal deze berekening gedaan worden door een desktopcomputer, met meer dan genoeg rekenkracht en zal dit dus geen probleem vormen.

Testprogramma Excel

Om te beoordelen of de methode in de praktijk toepasbaar is, is het algoritme in Excel geïmplementeerd. Met behulp van data verkregen via een netwerkanalysator is het gelukt om de temperatuur van het kristal af te leiden op basis van de frequentieverchuivingen van twee resonantiemodi. Deze test is uitgevoerd zonder verandering in massa, omdat dit de test enorm complex zou maken.

5.4 HOE VEEL VERSCHILLEN DE EIGENSCHAPPEN TUSSEN KRISTALLEN VAN DEZELFDE PRODUCENT, VERSCHILLENDEN BATCHES EN BINNEN DE BATCH?

De vraag in hoeverre de eigenschappen van SC-cut kristallen variëren tussen verschillende batches of zelfs binnen dezelfde batch is op dit moment moeilijk te beantwoorden. Er is tot nu toe geen systematisch onderzoek gedaan naar de spreiding van bijvoorbeeld de resonantiefrequentie, de temperatuurafhankelijkheid of de kwaliteit van de verschillende modi tussen meerdere kristallen van één fabrikant.

Het belang van deze vraag ligt vooral bij de kalibratiestrategie. Als blijkt dat de eigenschappen van kristallen sterk uiteenlopen, kan dit betekenen dat elke eenheid afzonderlijk gekalibreerd moet worden. Dit is logistiek ongunstig, maar geen fundamenteel probleem: het beïnvloedt enkel de productiekosten of -tijd, niet de werking of haalbaarheid van het systeem zelf.

Daarom wordt deze vraag doorgeschoven naar een latere fase van het project. In een toekomstig experiment met een functionerend proof-of-concept zal een populatie kristallen worden geanalyseerd op spreiding in temperatuur- en frequentierespons.

Op basis van die data kan worden bepaald of een eenmalige generieke kalibratie volstaat, of dat per stuk individuele kalibratie noodzakelijk is.

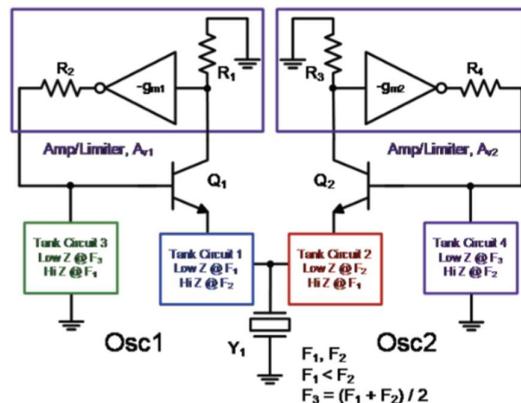
5.5 HOE KUNNEN TWEE RESONANTE FREQUENTIES GELIJKTIJDIG GEMETEN WORDEN?

Om de dual-mode temperatuur compensatie mogelijk te maken moet de frequentie van twee resonante modi gelijktijdig gemeten worden.

5.5.1 Dual-oscillator

In het PID was ervoor gekozen om een dual-oscillator ontwerp te realiseren (Wardenaar F., 2025). Deze keuze was destijds goed onderbouwd en gebaseerd op literatuur en voorbeelden van bestaande ontwerpen. Echter, in de praktijk bleek deze benadering door simulatieresultaten en praktische afwegingen toch niet geschikt voor deze toepassing.

Het basisidee achter het ontwerp is twee standaardoscillatoren (zoals Clapp-, Colpitts- of Pierce-oscillatoren) in parallelle configuratie. Deze laten het kristal gelijktijdig met verschillende frequenties oscilleren. Door middel van frequentie-selectieve filters zouden deze oscillatoren elkaar niet beïnvloeden. Figuur 5-2 toont een high level voorbeeld van zo'n configuratie.



Figuur 5-2: Dual oscillator diagram (Sandia, 2021)

Positieve eigenschappen

Het ontwerp had enkele duidelijke voordelen:

- De schakeling is in de basis relatief eenvoudig opgebouwd met weinig componenten.
- Het principe is helder en aantrekkelijk vanwege de schijnbare eenvoud van implementatie.
- Er zijn veel (10+) bronnen beschikbaar waarin kristaloscillatoren worden aangestuurd op meerdere modi – hoewel dit niet altijd in het kader van QCM-toepassingen is.

Problemen in de praktijk

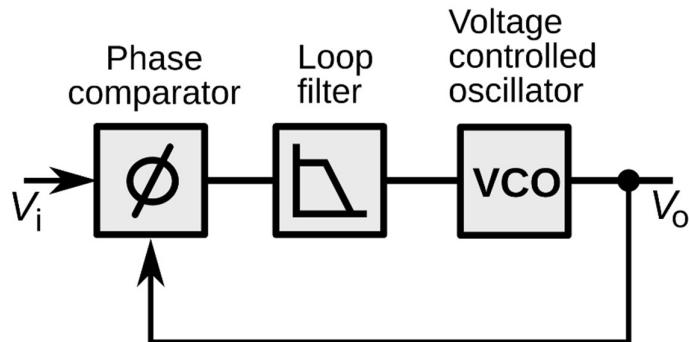
Toch bleken er in de simulaties en analyses aanzienlijke problemen:

- Het ontwerp is lastig af te stemmen. De twee oscillatoren beïnvloeden elkaar ondanks de filters, en streven ernaar om op dezelfde frequentie te oscilleren.
- Vanwege de frequentieververschuiving van 5% over de levensduur van het kristal (zie eis 2.6), is het risico groot dat de oscillator spontaan “verspringt” naar de andere modus. Dit zou betekenen dat het systeem opnieuw moet worden afgestemd door de gebruiker. Dit is onwenselijk omdat het systeem erg gevoelig is, en met vier variabele filters, zou dit veel tijd en moeite kosten.
- Bovendien is het wiskundig lastig te modelleren. Waardoor het lastig is theoretisch te voorspellen wat de gewenste waarden zijn.

Op basis van deze bezwaren is uiteindelijk besloten om het dual-oscillator ontwerp niet te implementeren in de uiteindelijke versie van het systeem.

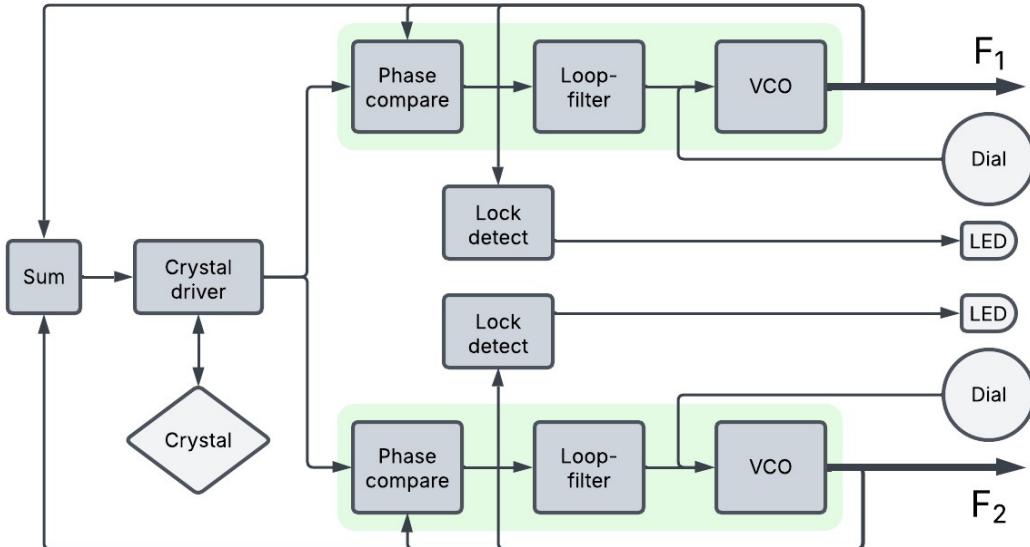
5.5.2 Phase-locked loop

Het systeem in designs gebaseerd op het principe van een Phase-Locked Loop (PLL). Dat is een regelsysteem waarbij de uitgangsfrequentie van een spanningsgestuurde oscillator (VCO) automatisch wordt geregeld op een ingangssignaal (Figuur 5-3: PLL-diagram (Wikipedia, 2025)). In het basisprincipe geldt dat het systeem het faseverschil tussen het ingangs- en uitgangssignaal op 90 graden probeert te houden. Hiermee houdt het de twee frequenties gelijk.



Figuur 5-3: PLL-diagram (Wikipedia, 2025)

In het artikel van Ferrari et al. wordt een PLL-systeem beschreven waarbij het uitgangssignaal wordt teruggekoppeld naar het kristal (zie het HLD in Figuur 5-4: High level design). Op deze manier zal de ingangsfrequentie altijd gelijk zijn aan de uitgangsfrequentie. Dit maakt deze implementatie bijzonder, omdat hierdoor namelijk uitsluitend op fase geregeld. Wanneer het kristal resoneert, veroorzaakt dit een faseverschuiving in het teruggekoppelde signaal. De PLL stuurt het systeem zodanig aan dat deze verschuiving 90 graden bedraagt, waardoor de uitgangsfrequentie automatisch de resonantiefrequentie van het kristal volgt. Deze frequentie wordt vervolgens gemeten met een frequentieteller, waarmee de resonantie van het kristal kan worden bepaald. Dit werkt pas wanneer het systeem een “lock” heeft, wat wil zeggen dat de resonantie gevonden is en gevuld wordt. Het PLL-deel van dit systeem wordt twee keer toegepast, zodat twee resonanties kunnen worden.



Figuur 5-4: High level design

Het regelsysteem kan pas locken op een resonantiefrequentie wanneer de VCO-frequentie zich al dicht in de buurt daarvan bevindt. Om het systeem naar een resonantiepunt te leiden, kan de gebruiker handmatig de VCO-frequentie instellen met een draaiknop. Dit is essentieel omdat de resonante frequenties niet op dezelfde frequentie blijven. Zodra het systeem een lock bereikt, wordt dit gedetecteerd door de lock-detectieschakeling, die een LED op het voorpaneel inschakelt als visuele bevestiging.

5.5.3 Voordelen van een PLL-oplossing

Oorspronkelijk werd de keuze voor een PLL-gebaseerde oplossing niet overwogen. Daarvoor waren destijds meerdere redenen. Ten eerste werd een PLL-systeem beschouwd als een veel complexer geheel met veel afzonderlijke componenten, wat de implementatie onnodig ingewikkeld leek te maken. Daarnaast was er op dat moment geen literatuurbron beschikbaar die een dergelijke oplossing toepaste binnen een dual-mode oscillatorconfiguratie. Het idee werd enkel als suggestie aangereikt door de stagebegeleider en was verder niet technisch uitgewerkt of onderbouwd. Tot slot was de werking van een PLL op dat moment nog onvoldoende begrepen, waardoor de technische uitdaging werd overschat.

Naarmate het project vorderde en de kennis over PLL-systeem toenam, werden ook de voordelen van deze aanpak duidelijk. Een belangrijk voordeel is het instellen van de oscillatoren: dit kan veel eenvoudiger worden uitgevoerd, bijvoorbeeld met slechts één draaiknop per mode. Bovendien biedt een PLL-systeem de mogelijkheid om een 'lock-indicatie' te genereren, waarmee bevestigd kan worden dat het systeem correct is afgestemd. Ook bleek de PLL-configuratie aanzienlijk minder gevoelig voor componentafwijkingen, wat het ontwerp robuuster maakt en het ontwikkelproces vereenvoudigt. Ten slotte bleek dat deze oplossing zou werken over een groot frequentiebereik, wat veel flexibiliteit zou bieden met de gebruikte modi. Hierdoor hoeft de hardware niet aangepast te worden bij het wisselen van modi.

Het omslagpunt kwam toen er uiteindelijk wel een publicatie werd gevonden waarin een PLL-benadering succesvol werd toegepast in een vergelijkbaar dual-mode oscillatiesysteem (Ferrari et al., 2008). Deze vondst maakte de aanpak aanzienlijk aantrekkelijker en leidde ertoe dat de

eerder gekozen dual-oscillatorbenadering definitief werd losgelaten ten gunste van het PLL-ontwerp.

6 TECHNISCH ONTWERP

Dit hoofdstuk presenteert het resultaat van de technisch-ontwerpfase van het project. Binnen deze fase zijn belangrijke mijlpalen behaald: het opstellen van het elektrisch schema, het ontwerpen van het PCB, het uitvoeren van simulaties en het uitwerken van een BOM. Deze bestanden worden samen met dit document geleverd. Voor meer informatie hierover, zie bijlage F.

In deze fase is ook een testplan gemaakt voor de fase “Technische tests”. Dit plan is te vinden in paragraaf 7.1.1.

De structuur van dit hoofdstuk volgt de opbouw van het high-level ontwerp. Elk functioneel blok wordt afzonderlijk besproken: de kristalaansturing, de fasevergelijker, de lock detectie, het loopfilter, de spanningsgestuurde oscillator (VCO) en de optelschakeling. Waarna enkele algemene eigenschappen van het ontwerp besproken, zoals signaal integriteit en ontkoppeling. Tot slot zal de realisatie kort besproken worden.

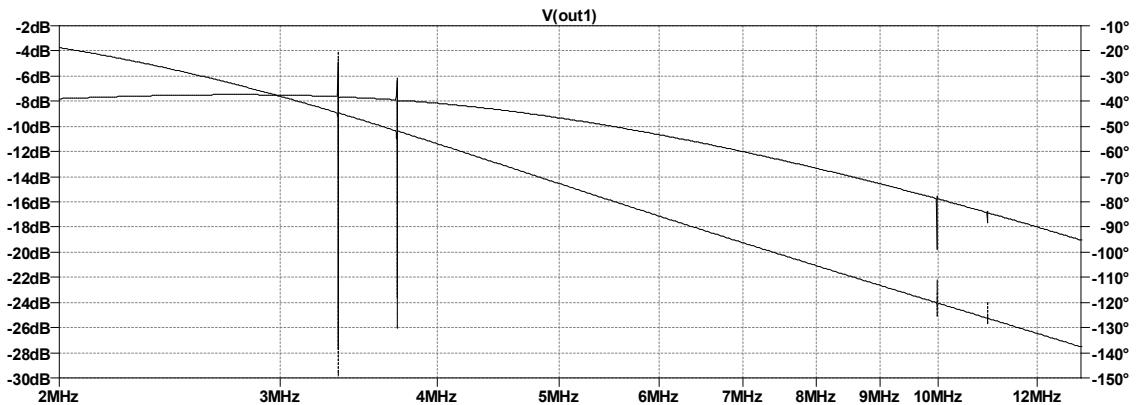
6.1 KRISTALAANSTURING

Vanwege de ontwerpvoorwaarde dat het kristal aan wordt aangesloten met één gearde BNC-connector, wordt gebruikgemaakt van de serieresonantie. In deze opstelling is het kristal met slechts een elektrode verbonden met de schakeling. Bij serieresonantie heeft het kristal zijn laagste impedantie bij de resonantiefrequentie. Dit wordt benut door het kristal op te nemen in een niet-inverterende versterkerconfiguratie, waarbij het kristal de rol vervult van de impedantie die normaal met aarde is verbonden (zie de bovenste helft van Figuur 6-2). Formule 6.a laat de overdracht van deze schakeling zien, waaruit af te leiden is dat de versterking groter is bij een kleinere kristalimpedantie. Op deze manier worden de resonante frequenties, de punten waar de impedantie het laagst is, versterkt.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{Z_F}{Z_{Xtal}} \quad [6.a]$$

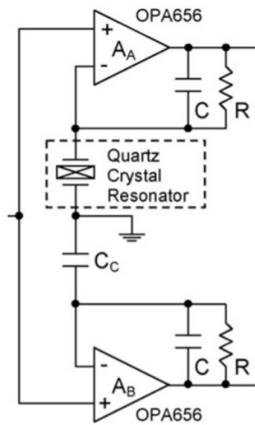
Hierbij is Z_F de feedbackimpedantie en Z_{Xtal} de kristalimpedantie. V_{in} & V_{out} zijn de in- en uitgangsspanningen.

Het systeem wordt geregeld op 90 graden faseverschuiving. Iets waar kristal en bijbehorende elektronica voor zouden zorgen als het kristal serie-resonant is. Uit simulaties bleek echter dat bij hogere orde harmonischen, zoals de derde harmonische (10MHz), het kristal slechts enkele graden faseverschuiving veroorzaakt (Figuur 6-1), wat onvoldoende is voor een lock. Dit effect wordt veroorzaakt door de parasitaire capaciteiten van het kristal en de verbonden kabel.



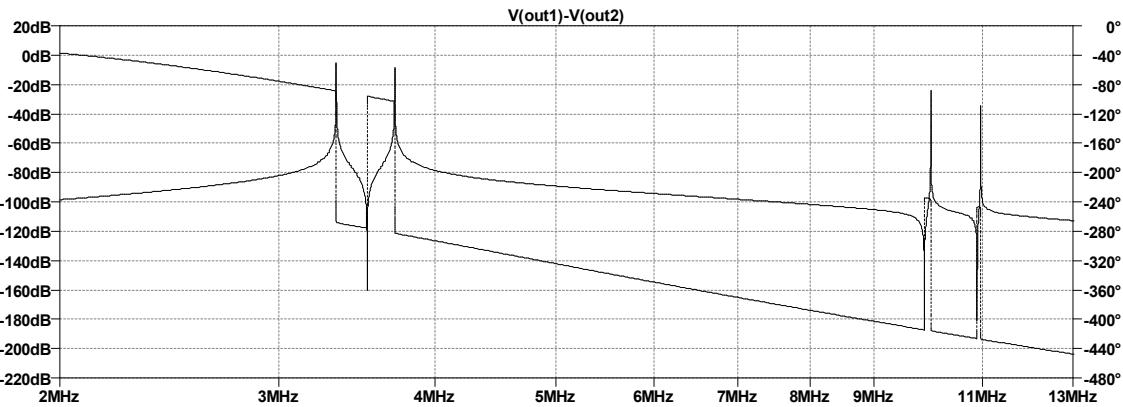
Figuur 6-1: Frequentierespons enkele versterker [Doorgezogen: Amplitude, Stippel: Fase]

Om dit probleem te verhelpen, wordt een tweede, parallelle versterker gebruikt. In plaats van een kristal bevat deze versterker een capaciteit C_c gelijk aan de parasitaire capaciteit (Figuur 6-2).



Figuur 6-2: Capaciteit compensatie (Ferrari et al., 2008)

Zo wordt een respons gecreëerd die identiek is aan die van de kristalversterker—behalve bij de resonantiepunten. Het verschilsignaal van deze signalen bestaat slechts uit de resonante frequenties (Figuur 6-3). Alle resterende frequenties worden sterk gedempt. De fase van het verschilsignaal verschuift bij elke resonante mode 180 graden, waardoor het altijd een faseverschil van 90 graden passeert, en een lock kan behalen.



Figuur 6-3: Frequentierespons verschilsignaal (let op y-as) [Doorgetrokken: Amplitude, Stippel: Fase]

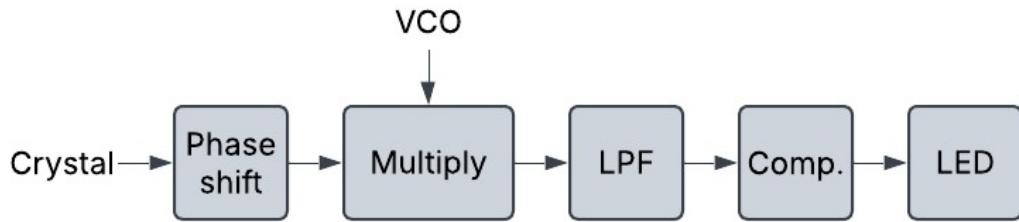
6.2 FASEVERGELIJKER

Het faseverschil tussen het VCO-signalen en het signaal van het kristal wordt bepaald door deze signalen met elkaar te vermenigvuldigen. Daarbij ontstaat een DC-component aan de uitgang die evenredig is met de faseafwijking ten opzichte van 90 graden. Wanneer de signalen exact 90 graden uit fase zijn, is deze DC-component nul.

Elke fasevergelijker bestaat uit een analoge multiplier-IC, die het verschil tussen de signalen op de X+ en X- ingang vermenigvuldigt met het verschil tussen Y+ en Y- ingang. Dit maakt het mogelijk om het verschilsignaal van de kristalaansturingstap te vermenigvuldigen (zie paragraaf 6.1).

6.3 LOCK-DETECT

De lock-detect schakeling wordt schematisch weergegeven in Figuur 6-4.



Figuur 6-4: Lock-detect blokschema

De lock-detectschakeling maakt gebruik van hetzelfde analoge multiplier-IC als de fasevergelijker. In dit geval wordt het kristalsignaal eerst 90 graden in fase verschoven voordat het de multiplier binnentreedt. Wanneer de PLL in lock is, levert dit een DC-offset op aan de uitgang van de multiplier. Deze spanning wordt vervolgens gefilterd met een low-pass-filter (LPF) en aangeboden aan een comparator. De comparator vergelijkt deze waarde met een instelbare referentiespanning. Zodra de drempel wordt overschreden, schakelt de comparator een LED op het voorpaneel in, zodat de gebruiker direct kan zien dat de PLL in lock is.

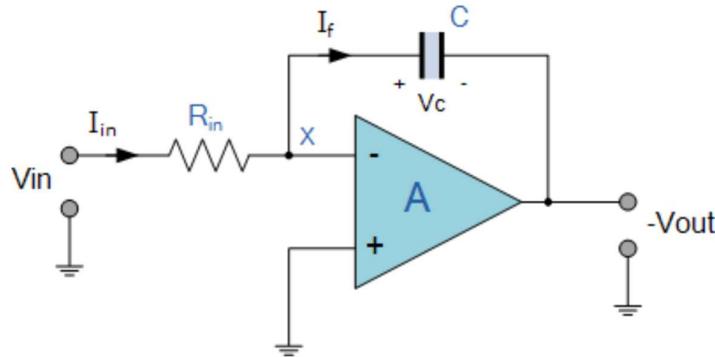
6.4 LOOP-FILTER

Het loopfilter speelt een cruciale rol in een PLL. Het filtert het uitgangssignaal van de fasevergelijker en bepaalt daarmee de dynamiek van het regelsysteem. Het zorgt ervoor dat het

hoogfrequente VCO-signalen geblokkeerd wordt, terwijl langzamere afwijkingen worden doorgelaten om de VCO bij te sturen. Hiermee beïnvloedt het filter de stabiliteit, reactietijd en onderdrukking van faseruis binnen de PLL.

6.4.1 Integratorschakeling

Het loopfilter in de PLL is een integratorschakeling. Deze bestaat uit een opamp met een condensator in de terugkoppelbus (Figuur 6-5).



Figuur 6-5: Integratorschakeling(Op-amp Integrator, 2022)

$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in}C} \cdot \int_0^t V_{in} dt \quad [6.b]$$

De werking van deze schakeling wordt beschreven door Formule 6.b. Hieruit blijkt dat het product van de ingangsimpedantie R_{in} en de capaciteit C bepaalt hoe snel de uitgangsspanning V_{out} verandert. Dit bepaalt op zijn beurt hoe snel de regellus kan reageren op een foutsignaal.

Een hoge regelsnelheid is hierbij gunstig, omdat hiermee de ruis van de VCO kan worden onderdrukt.

6.4.2 Dempen van de regellus

Omdat een pure integrator in combinatie met de fasevergelijker een ongewenste lusresonantie kan veroorzaken. De fasevergelijker heeft namelijk een integrerende werking: $\phi = \int \omega(t) dt$. Twee integratoren in serie zouden namelijk samen een fasoverschuiving van 180 graden veroorzaken, wat bij positieve terugkoppeling kan leiden tot instabiliteit.

Om deze reden wordt in PLL-implementaties standaard een weerstand in serie met de feedback condensator geplaatst. Deze weerstand zorgt voor extra demping van de integrator, waardoor oscillaties worden voorkomen.

In deze schakeling is de seriere weerstand uitgevoerd als een instelbare trimmer. Deze staat standaard op nul, maar kan bij het optreden van oscillaties eenvoudig worden aangepast om demping toe te voegen.

6.5 VCO

Voor de spanningsgestuurde oscillator (VCO) kon er gekozen worden uit twee oplossingsrichtingen: een lineaire VCO en een digitale VCO. Een lineaire VCO bestaat uit

discrete componenten en genereert een sinusachtig uitgangssignaal. Een digitale VCO daarentegen is doorgaans een geïntegreerde schakeling (IC) die blokgolven genereert.

Omdat dit een lineaire PLL is lag de voorkeur bij de lineaire VCO-schakeling. Maar omdat deze schakeling een redelijk complex analog ontwerp is en de student slechts beperkte ervaring had met het ontwerpen van analoge elektronica, is de keuze gemaakt om beide VCO-opties op de printplaat te implementeren. Door het plaatsen van $0\ \Omega$ -weerstanden kan worden geselecteerd welke VCO wordt gebruikt.

6.5.1 Digitale VCO

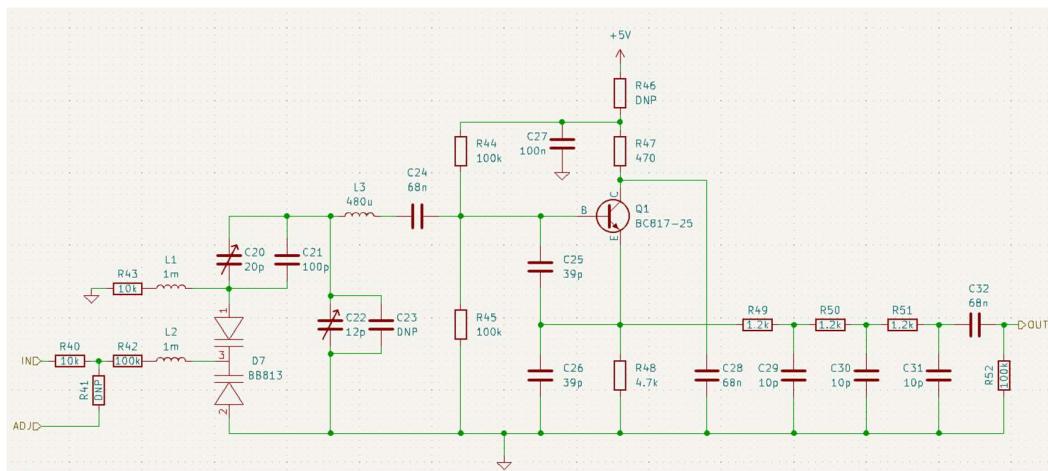
De 74HC7046 is een veelgebruikte IC binnen PLL-toepassingen en bevat een interne fasevergelijker, lock-detector en VCO. Het is geselecteerd omdat het de meest populaire IC is, geschikt voor frequenties rond de 10 MHz.

Het IC werkt volledig digitaal en een digitale fasedetector kan door zijn alineairiteit niet overweg kan met een superpositie van twee signalen. Hierdoor kan de ingebouwde digitale fasedetector in het IC niet worden gebruikt.

De uitgang van de VCO levert een blokgolf, die met een reeks RC-filters wordt omgevormd tot een gedempte sinus, zodat deze geschikt is voor verdere verwerking. Het gewenste frequentiebereik wordt ingesteld via een trimmerweerstand.

6.5.2 Lineaire VCO

De lineaire variant is gebaseerd op de Clapp-oscillatorschakeling. Deze schakeling bestaat voornamelijk uit passieve componenten, met een enkele transistor als actief element (Ulansky et al., 2009). De frequentie van het gegenereerde signaal is afhankelijk van het product van de inductie en capaciteit. In dit ontwerp wordt er gebruikgemaakt van varicaps om de capaciteit en daarmee de frequentie te moduleren (zie Figuur 6-6). Varicaps zijn condensatoren waarvan de capaciteit proportioneel is van de dc-spanning die erover staat. Door trimmercondensatoren in serie en parallel met de varicaps te plaatsen, kunnen zowel de centerfrequentie als het frequentiebereik worden afgesteld.



Figuur 6-6: Clapp oscillator-schakeling

Als deze schakeling niet gebruikt wordt en zijn in- en uitgangen zijn losgekoppeld, blijft deze nog oscilleren, wat storing op de voeding kan veroorzaken. Om dit te voorkomen, is de voedingslijn los te koppelen met een $0\ \Omega$ -weerstand.

6.5.3 Instelmogelijkheden

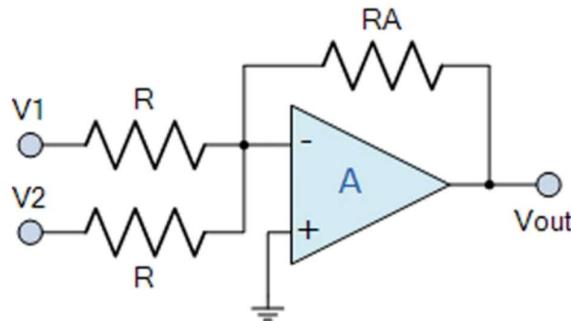
De kristalfrequenties zullen met 5% zullen verlopen over zijn levensduur. Om te zorgen dat dit binnen het regelbereik van de VCO blijft, kan de center-frequency van dit bereik worden aangepast met een tienlagspotmeter aan het voorpaneel.

Omdat de relatief lange paden mogelijk storing zullen oppikken, zijn deze potmeters met 0-Ohm weerstanden te vervangen door trimmer weerstanden dicht bij de oscillatoren.

6.6 OPTELLER

De taak van de opteller is om de signalen van de twee VCO's bij elkaar op te tellen. De summing-amplifier is een eenvoudige schakeling die deze taak kan vervullen (zie Figuur 6-7). De uitgangsspanning wordt bepaald door vergelijking 6.d, waaruit volgt dat deze spanning evenredig is aan de som van de ingangsspanningen. De versterkingsfactor is afhankelijk van de waarde van weerstand R_A . In dit ontwerp is R_A instelbaar gemaakt, zodat de versterking naar behoefte kan worden aangepast.

$$V_{out} = -\frac{R_A}{R} \cdot (V_1 + V_2) \quad [6. d]$$



Figuur 6-7: Summing-amplifier (Summing Amplifier, 2021)

6.7 ALGEMENE ONTWERPEIGENSCHAPPEN

Dit hoofdstuk behandelt ontwerpe keuzes zoals de voedingsstructuur, signaalintegriteit en PCB-afmetingen.

6.7.1 Voeding

Externe voeding

Aangezien het ontwerpen van een stabiele voeding buiten de scope van de opdracht valt, is ervoor gekozen het PCB te voeden met een externe labvoeding via bananenstekkers. Hiervoor is een labvoeding vereist die zowel positieve als negatieve spanningen kan leveren.

Zowel de +5 V als de -5 V voedingslijnen hebben elk een indicatie-LED op het voorpaneel, zodat snel visueel kan worden gecontroleerd of de spanning aanwezig is.

Voedingsverdeling op het PCB

De voedingsspanningen V+ en V- worden verdeeld via de derde laag van het vierlaags-PCB. Deze laag is onderverdeeld in twee aparte vlakken voor V+ en V-, die zich uitstrekken tot alle relevante delen van het circuit. De opbouw met brede vlakken zorgt voor een lage impedantie. Bovendien bevindt zich op de derde laag een parallel aardvlak, wat resulteert in een aanzienlijke

parasitaire capaciteit tussen de voedings- en aardvlakken. Deze capaciteit helpt bij het onderdrukken van ruis op de voeding.

Ingangsbeveiliging

Om het circuit te beschermen tegen foutieve of schadelijke invoer van voedingsspanningen, zijn verschillende beschermingsmaatregelen getroffen:

- **Resetbare zekeringen**

Deze zekeringen beschermen tegen kortsluitingen door de stroom te beperken bij overstroom. Ze resetten automatisch nadat het probleem is opgelost, waardoor schade aan het circuit of brandgevaar wordt voorkomen.

- **Ferrietkralen**

Ferrietkralen filteren hoogfrequente ruis uit de voedingslijnen. Ze werken als impedantie voor hoogfrequente signalen zonder noemenswaardige weerstand te introduceren voor DC-stromen.

- **Unidirectionele TVS-diodes (transient voltage suppressor)**

Deze diodes bieden bescherming tegen overspanning én tegen spanningen met omgekeerde polariteit. Ze schakelen snel in bij spanningspieken, waardoor gevoelige componenten niet beschadigd raken.

- **Ontkoppelcondensatoren bij de voedingsingang**

Direct bij de voedingsingang zijn ontkoppelcondensatoren geplaatst om storingen en ruis van buitenaf te onderdrukken voordat deze het circuit binnendringen. Ze vormen een laagimpedant pad naar massa voor hoogfrequente signalen en spanningspieken die via de voedingskabels binnenkomen. Dit voorkomt dat HF-ruis of transiënten zich via de voedingslijnen verspreiden over het PCB. Er is gekozen voor een combinatie van elektrolytische condensatoren (voor lage frequenties en grotere energie-inhoud) en keramische condensatoren (voor hoge frequenties en snelle respons).

6.7.2 Ontkoppeling en signaalintegriteit

In het ontwerp is veel aandacht besteed aan ontkoppeling en signaalintegriteit om een stabiele werking van het systeem te waarborgen. Alle geïntegreerde schakelingen zijn voorzien van lokale ontkoppelcondensatoren, die spanningsschommelingen op de voedingslijnen opvangen en hoogfrequente ruis onderdrukken. De versterkende IC's, zoals operationele versterkers en vermenigvuldigers, zijn via een serieweerstand van $10\ \Omega$ aangesloten op de voedingsrails. Deze weerstand beperkt de overdracht van hoogfrequente ruis via de voeding en dempt reflecties, waardoor onderlinge beïnvloeding tussen componenten wordt voorkomen.

Om reflecties op signaalsporen tussen IC's te onderdrukken, is aan de laagimpedante zijde van deze verbindingen een serieweerstand van $33\ \Omega$ geplaatst. Daarnaast zijn de componenten binnen elk functioneel blok zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst. Dit minimaliseert de lengte van stroomlussen en vermindert de kans op inductieve koppeling of overspraak.

Verder is de ruimte onder de spoelen vrijgehouden van koper om ongewenste parasitaire capaciteiten te beperken. Zowel de bovenste als de onderste laag van het PCB zijn voorzien van een aaneengesloten aardvlak, dat strategisch tussen signaalbanen gepositioneerd is om overspraak tegen te gaan. Om de aarding robuust te maken, zijn door het hele PCB structureel

geplaatste via's opgenomen, die de drie aardvlakken onderling verbinden. Deze maatregelen dragen gezamenlijk bij aan een hoge signaalkwaliteit en een betrouwbaar systeemgedrag.

6.7.3 PCB-afmetingen

De printplaat heeft een formaat van 159×150 mm. Deze afmetingen zijn gekozen zodat het ontwerp past in een standaardbehuizing die vaker wordt gebruikt binnen de ELD-afdeling: de M5501119 (Figuur 6-8). De PCB kan in het kastje worden gemonteerd met behulp van de connectoren die in het voor- en achterpaneel schroeven. De behuizing is vooral voor het uiterlijk. Het PoC zal zonder even goed werken

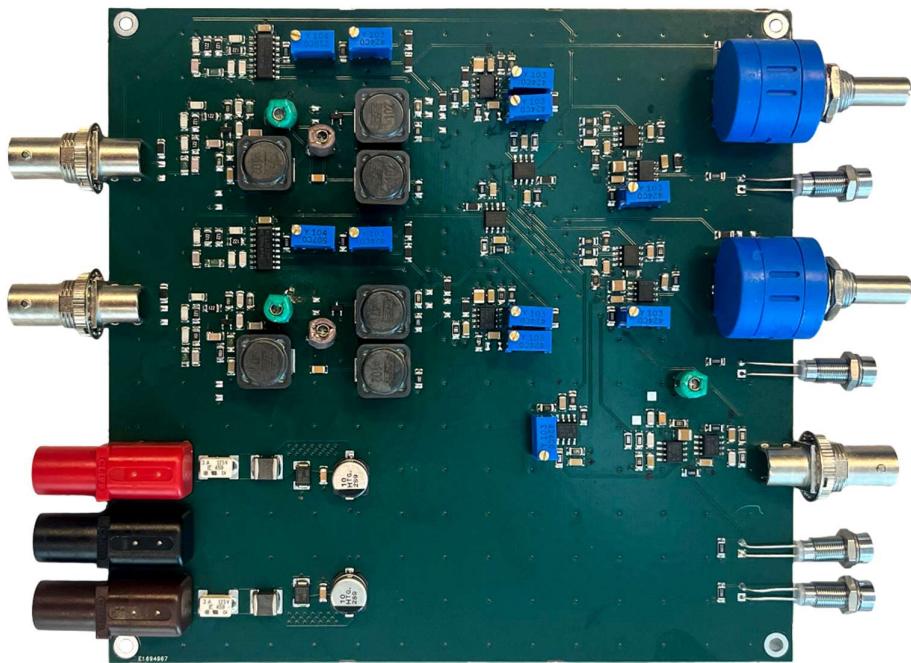


Figuur 6-8: M5501119 Behuizing (M5501119, n.d.)

6.8 REALISATIE

6.8.1 PCB

Vanwege tijdsgebrek is de assemblage van de PCB (Figuur 6-9) niet door de student zelf uitgevoerd, maar is deze taak uitbesteed aan een collega. De SMD-componenten zijn geplaatst en gesoldeerd met behulp van een dampoven. De THT-componenten zijn vervolgens handmatig gesoldeerd.



Figuur 6-9: Gerealiseerd PCB

6.8.2 Behuizing

De behuizing van het systeem is op dit moment nog niet volledig gerealiseerd. De metalen panelen aan de voor- en achterkant zijn nog niet bewerkt. Dit ook als gevolg van tijdsgebrek. Hierdoor is het tijdens de testfase niet mogelijk om de PCB in een definitieve behuizing te plaatsen.

Er wordt echter verwacht dat het ontbreken van een behuizing tijdens de testfase geen significante invloed zal hebben op de prestaties van het systeem. Het wordt ingeschat dat het ontwerp niet gevoelig is voor elektromagnetische interferentie.

7 VALIDATIE

Dit hoofdstuk zal ingaan op de validatiefasen: Technische tests, Functionele tests en Acceptatie tests. De vooraf gemaakte testplannen worden hier beschreven.

Op het moment van schrijven bevindt het project zich in de technische testfase. Er zal daarom alleen van de technische tests de uitvoering en resultaten besproken worden.

Tabel 7-1: Testniveau overzicht

Testniveau	Status	Doelstelling
Technische tests	Uitgevoerd	Verifiëren of de subsystemen technisch correct functioneren (bijv. signaal generatie, voedingsspanningen).
Functionele tests	Geformuleerd	Controleren of het systeem als geheel de gespecificeerde functies los van elkaar uitvoert.
Acceptatietests	Geformuleerd	Beoordelen of het systeem als geheel de gespecificeerde functies tegelijkertijd uit kan voeren.

7.1 TESTPLANNEN

Tijdens de ontwerpfasen zijn er testplannen opgesteld. In dit hoofdstuk staan deze beschreven.

7.1.1 Technische tests

In deze testfase wordt de basisfunctionaliteit van het PoC beproefd.

Doordat het een geregelde systeem is, is het lastig om de verschillende modules los van elkaar te evalueren. Door een gebrek aan gemakkelijke testmogelijkheden en tijd om deze uit te voeren worden alleen de voeding en de VCO beproefd. In een later stadium zijn tests bedacht voor alle technische modules (zie 7.2.3 Vervolgtests).

Voedingstest

Het doel van deze test is om te controleren of het systeem correct functioneert bij het inschakelen van de voeding. Daarbij wordt gekeken of het stroomverbruik binnen de verwachte grenzen blijft, of componenten niet oververhit raken, en of de voedingsspanningen correct worden geleverd aan alle onderdelen.

Voordat deze test kan worden uitgevoerd moet de PCB volledig geassembleerd zijn en moet deze visueel gecontroleerd zijn op soldeerfouten.

Op basis van de datasheets van de gebruikte componenten is het verwachte totaalverbruik van het systeem in rusttoestand als volgt:

Tabel 7-2: Berekening stroomverbruik

COMPONENT	AANTAL	MAX. RUSTSTROOM PER STUK	TOTAAL	BRON
OPA656	8	17 mA	136 mA	(OPA656 Datasheet, 2024)
AD836	4	25 mA	100 mA	(AD835 Datasheet, n.d.)

74HC7046	2	8 mA	16 mA	(CD74HC7046A Datasheet, 2003)
TOTAAL			252 mA	

Een marge van 48 mA is gereserveerd voor overige verbruikers en meetnauwkeurigheden. De voeding wordt daarom ingesteld op een limiet van 300 mA.

Bij het inschakelen van de voeding worden de volgende punten op volgorde getest:

1. De voeding blijft in zijn spanningsgelimiteerde mode
2. De voeding indicator-LED's staan aan
3. De spanning op de voedingspootjes van de IC's komen overeen met de verwachting (meting door multimeter)
4. De componenten zijn na 15 minuten niet warmer dan 50 °C (meting door warmtebeeldcamera)

Mits het PoC aan al deze punten voldoen, slaagt de test.

Oscillatortests

Het doel van deze test is om te controleren of de oscillatoren op de print correct functioneren, een stabiel uitgangssignaal genereren en instelbaar zijn via de bijbehorende potmeters. De test richt zich op zowel de digitale als de lineaire VCO's die op de PCB zijn geplaatst.

Voordat deze test kan worden uitgevoerd, moet de PCB volledig geassembleerd zijn en succesvol de voedingstest hebben doorlopen.

De test bestaat uit twee delen: het testen van de digitale VCO's en het testen van de lineaire VCO's. De testprocedure is voor beiden hetzelfde.

Teststappen:

1. Plaats de benodigde 0-ohm weerstanden om de gewenste VCO te activeren.
2. Verbind de uitgang van de VCO met een oscilloscoop via een coaxkabel.
3. Schakel het systeem in.
4. Verander de frequentie met de bijbehorende potentiometer.
5. Observeer het uitgangssignaal op de oscilloscoop.

Succescriteria:

- Het uitgangssignaal is zichtbaar op de oscilloscoop.
- Het signaal heeft een sinusachtig karakter (licht vervormde sinusvorm).
- De frequentie verandert bij draaien aan de potentiometer.
- De frequentie kan minstens gevarieerd worden tussen 1MHz en 15 MHz.

Als de digitale en/of de lineaire VCO's voldoen aan bovenstaande succesriteria, is de oscillatiefunctie van het systeem technisch gevalideerd. Bij afwijkingen dient verdere analyse te worden uitgevoerd, met nadruk op soldeerverbindingen, voedingsspanningen en PCB-layout.

7.1.2 Functionele tests

T2.1, T2.2, T2.3: PLL lock test

Het doel van deze tests is om te verifiëren of de PLL-systemen correct functioneren en in staat zijn een stabiele lock te verkrijgen op de gewenste frequenties. Deze test wordt uitgevoerd op drie niveaus: de eerste harmonische van de B-mode, de derde harmonische van de C-mode, en de dual-mode configuratie waarbij beide PLL-kringen gelijktijdig actief zijn.

Voordat deze test kan worden uitgevoerd, moet de voedingstest en de oscillatortest met succes zijn afgerond. Ook moeten enkel de gewenste VCO's ingeschakeld zijn met 0-ohm weerstanden.

De single-mode tests volgen dezelfde stappen en hebben dezelfde testcriteria. De dual-mode test is simpelweg de twee voorgaande tests gelijktijdig uitgevoerd. Hiervoor dienen de twee VCO's ingeschakeld te worden.

Teststappen:

1. Schakel één van de twee PLL-kringen in door de VCO aan te sluiten met de 0-ohm weerstanden.
2. Maak de capaciteit van de compensatie trimmercondensator gelijk aan de capaciteit van het aangesloten kristal en kabel.
3. Verbind een oscilloscoop probe met de multiplier output.
4. Monitor tegelijkertijd het uitgangssignaal van de VCO met een frequentieteller.
5. Stel met de potmeter de VCO in op een frequentie dicht bij de gewenste resonantiefrequentie van het kristal.
6. Observeer het gedrag van de multiplier output en de frequentie.

Succescriteria:

- Het outputsignaal van de lock-detector-multiplier vertoont een duidelijke DC-component.
- Het lock-detectie lampje gaat aan wanneer er een lock optreedt.
- De uitgangsfrequentie van de VCO blijft stabiel met slechts enkele tientallen hertz aan variatie.
- Er is geen overmatige ruis ($<\pm 100\text{Hz}$) zichtbaar.
- Bij het opwarmen van het kristal, door zijn behuizing vast te houden, veranderd de frequentie.

Als in alle drie de testfasen een stabiele lock wordt verkregen onder de gespecificeerde voorwaarden, wordt de PLL-functionaliteit als succesvol gevalideerd beschouwd.

T2.4: Temperatuurcompensatietest

(Dit testplan was geformuleerd in het PID (Wardenaar F., 2025))

Om de effectiviteit van de temperatuurcompensatie te testen, wordt de QCM in een oven geplaatst waarin de temperatuur stapsgewijs wordt verhoogd van 20°C tot 100°C. Tijdens deze

test wordt de gecompenseerde massawaarde continu bijgehouden. De test wordt als succesvol beschouwd wanneer de gecompenseerde frequentie minder dan 0,2 ppm/°C verandert over het gehele temperatuurbereik.

T2.5: Massameettest

(Dit testplan was geformuleerd in het PID (Wardenaar F., 2025))

Voor de evaluatie van de massameting wordt de QCM in een opdampopstelling geplaatst. Op een sample wordt een lijn getrokken met een permanente marker, waarna een 1um laag aluminium wordt opgedampt. Vervolgens wordt de marker verwijderd met isopropanol, waardoor een scherpe overgang in de laag ontstaat. De dikte van de opgedampte laag wordt gemeten met een scanning-tunneling-microscope en vergeleken met de door de QCM gemeten waarde. De test is geslaagd wanneer de afwijking kleiner is dan 0,01 nm (zie eis Nr. 2.2). Om de betrouwbaarheid te waarborgen, zal deze test minstens drie keer worden uitgevoerd.

7.1.3 Acceptatie tests

Dit testplan was geformuleerd in het PID (Wardenaar F., 2025).

T3.1: Temperatuurcompensatie bij opdampen test

Ter verificatie van de algehele prestaties van de QCM wordt een opdamping uitgevoerd met niobium, dat een hoog smeltpunt heeft van 2477 °C. Hierbij zal gedurende 5 minuten met een opdampsnelheid van 0,20 nm/s worden opgedampt. De nauwkeurigheid van de QCM wordt beoordeeld door de gemeten waarde te vergelijken met de werkelijke laagdikte, op dezelfde manier als de vorige test. Deze test is geslaagd wanneer de afwijking minder dan 18 ppm bedraagt. Deze tolerantie is afgeleid uit de eis van 0,2 ppm/°C (eis Nr. 1.1), waarbij wordt aangenomen dat het kristal een maximale temperatuur van ongeveer 90°C bereikt.

7.2 TESTRESULTATEN

Tabel 3: Overzicht testresultaten

	Test	Verwacht	Gemeten	Resultaat
T1	Technische tests			
T1.1	Stoomverbruik	<300mA	200mA	Geslaagd*
T1.2	Warmte	<50 °C	34.7	Geslaagd
T1.3	Spanningsniveaus IC-voeding	Kloppen	Kloppen	Geslaagd
T1.4	Voeding indicator LED's	Aan	Aan	Geslaagd
T1.5	Komt signaal uit VCO's	Ja	Ja	Geslaagd*
T1.6	Uitgangssignaal is te sturen met potmeter	~1MHz- ~15MHz	86kHz- 15MHz	Geslaagd*
T2	Functionele tests			
T2.1	B-mode lock	Ja	Nee	Gefaald
T2.2	C-mode 3 ^{de} harmonische lock	Ja	Nee	Gefaald
T2.3	Dual-mode lock	Ja	-	-
T2.4	Temperatuurcompensatietest	<0.2 ppm/°C	-	-
T2.5	Massameettest	±0.02nm	-	-
T3	Acceptatie tests			
T3.1	Temperatuurcompensatie bij opdampen test	<18ppm	-	-

*met bijzonderheden

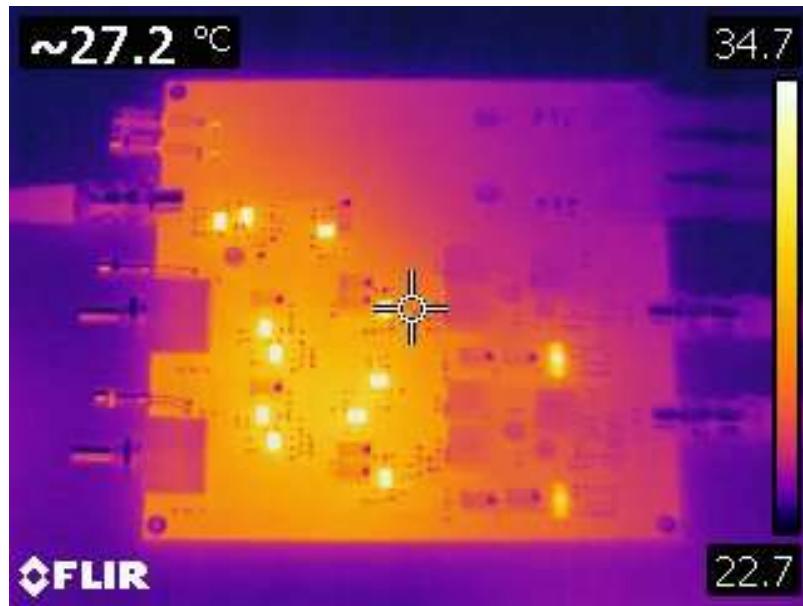
7.2.1 Technische testresultaten

Voedingstest [T1.1, T1.2, T1.3, T1.4]

- Bij het eerste inschakelen bleek de stroomopname hoger dan verwacht. Met behulp van een warmtebeeldcamera werden verkeerd geplaatste componenten geïdentificeerd. Na correctieve herplaatsing daalde het stroomverbruik tot binnen de verwachte grens.
- De actieve componenten (IC's) warmden tijdens bedrijf merkbaar op, maar bleven ruim onder de limiet van 50 °C (zie Figuur 7-1).
- Met een multimeter is bevestigd dat alle IC's de correcte spanningen ontvingen. Ook brandde de indicator-LED's. Hiermee zijn alle onderdelen succesvol van voeding voorzien.

Conclusie:

Na correctie van de foutieve plaatsingen is de voedingstest met succes afgerond.



Figuur 7-1: Warmtebeeld van PCB na 15 minuten aan staan (let op: PCB andersom t.o.v. Figuur 6-9)

Digitale VCO [T1.5, T1.6]

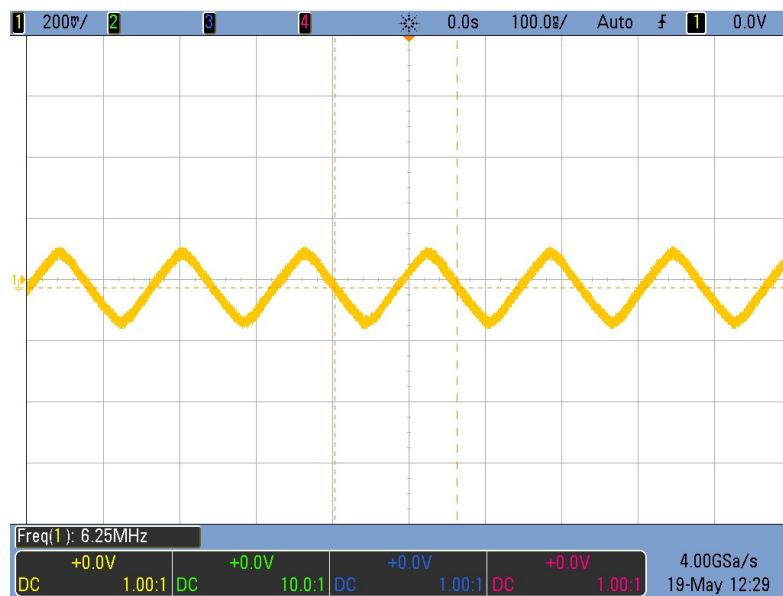
- Het uitgangssignaal van het VCO-IC was periodiek en lag in de verwachte frequentieband. Rond 6 MHz was het signaal echter sterk driehoekig van vorm (zie Figuur 7-2). Dit is het gevolg van onvoldoende filtering. Omdat de twee gekozen frequenties geen harmonischen van elkaar zijn, wordt dit niet als een serieus probleem ingeschat.
- Het ontwerp voorzag in het loskoppelen van de VCO met 0-ohm weerstanden. Er bleek echter geen mogelijkheid om de voeding naar het VCO-IC volledig te onderbreken, waardoor het VCO altijd zou oscilleren en storing zou veroorzaken. Door de

oscillatiecondensator te overbruggen, stopt de IC met oscilleren, en werd dit probleem opgelost.

- Een verdere ontwerpfwijking was dat de potmeter op het voorpaneel aangesloten was op de pin voor frequentiebereik in plaats van de centerfrequentie. Hierdoor beïnvloedde de draaiknop het bereik in plaats van de gewenste frequentiepositie. De centerfrequentie kon echter alsnog worden ingesteld via een trimpotmeter op de print, wat voldoende was voor testdoeleinden.
- Een andere observatie is dat, hoewel het frequentiebereik van 86kHz tot 15MHz gaat, dit verloop exponentieel is. Dit betekent dat het erg lastig is om bij hogere frequenties precieze aanpassingen te maken. Een oplossing hiervoor zou zijn het gebruik van logaritmische potmeters, of de toevoegingen van weerstanden om het instelbereik te verkleinen.

Conclusie:

Ondanks enkele ontwerptekortkomingen functioneerde het digitale VCO-IC zoals verwacht en kon het effectief worden getest.



Lineaire VCO [T1.5, T1.6]

- Er was geen uitgangssignaal waarneembaar.
- Onderzoek toonde aan dat de transistor die onderdeel uitmaakt van de oscillator foutief was geplaatst vanwege een fout in de footprint-toewijzing. Dit kon worden opgelost door de transistor gedraaid te solderen.
- Ondanks deze correctie bleef het uitgangssignaal afwezig. De exacte oorzaak hiervan is niet vastgesteld binnen de testtijd.

- Omdat het ontwerp slechts vereiste dat één van beide VCO-types functioneerde, werd deze test als niet-blokkerend beschouwd.

Conclusie:

De lineaire VCO gaf geen functioneel signaal, maar gezien de digitale VCO correct functioneerde en voldoende was voor de toepassing, wordt deze test niet als kritisch falen beschouwd.

7.2.2 Functionele testresultaten

Single-mode-lock test [T2.1]

- Vanwege de beperkte beschikbaarheid van 6 MHz SC-cut kristallen is voor deze test een 3.3 MHz SC-cut kristal gebruikt.
- De totale parasitaire capaciteit van het kristal en de aangesloten coaxkabel werd gemeten op 90 pF. Om deze capaciteit correct te compenseren is één parallelle condensator verwijderd en is de trimmercondensator handmatig afgesteld.
- De VCO-uitgangsfrequentie is vervolgens zo nauwkeurig mogelijk afgestemd op de verwachte resonantiefrequentie van het kristal, met behulp van de trimmerweerstand.

Waarnemingen:

- Er trad geen waarneembare lock op in de buurt van de resonantiefrequentie.
 - De lock-indicator LED lichtte niet op.
 - De uitgang van de lock-detector multiplier vertoonde geen significante DC-component die reageerde op de frequentieinstelling.
 - De frequentie van het VCO-singaal stabiliseerde niet, maar vertoonde variaties in de orde van kiloherzen.
 - Het gedrag van het systeem veranderde niet meetbaar in de buurt van de resonantiefrequenties vergeleken met andere frequenties.

Analyse:

- De oorzaak van het uitblijven van lock is nog niet vastgesteld.
- Een mogelijk probleem is dat het kristal door zijn hoge Q-factor, zeer weinig effect heeft net buiten zijn resonantie, wat het invangbereik erg klein kan maken. Mocht dit een probleem zijn kan de Q-factor worden verlaagd met een weerstand in serie met het kristal.
- Een gestructureerde aanpak is opgesteld om het systeem per module te analyseren (zie §7.2.3).

Gevolg:

- Aangezien single-mode lock een vereiste is voor verdere functionele tests, zijn de dual-mode en temperatuurcompensatiestests (nog) niet uitgevoerd.

Conclusie:

De single-mode lock test is niet geslaagd. Verdere functionele verificatie is afhankelijk van het eerst oplossen van deze blokkade. Verdere diagnose wordt gepland volgens de aanpak in §7.2.3.

7.2.3 Vervolgtests

Na het uitblijven van een succesvolle single-mode lock (zie §7.2.2) is besloten het systeem op te splitsen in afzonderlijke functionele blokken. Door de terugkoppellus te onderbreken wordt elk subsysteem afzonderlijk geëvalueerd met externe stimulatie, om zo de oorzaak van het falen te kunnen achterhalen.

Testvoorbereiding

- De uitgang van de VCO wordt losgekoppeld en de bijbehorende connector wordt gebruikt als ingang voor een externe functiegenerator.
- Door het systeem op deze manier open te breken, kunnen blokken worden getest zonder invloed van feedback.
- Alle metingen worden uitgevoerd met een oscilloscoop, functiegenerator en indien nodig een netwerkanalysator.

Opteller Test

Doel: Verifiëren dat de opteller correct de som van twee ingangen produceert.

Methode:

- Twee sinusvormige signalen met gelijke frequentie worden simultaan aangeboden via een functiegenerator.
- De uitgang van de opteller wordt bekeken met een oscilloscoop.

Verwachte resultaat: De uitgangsgolfvorm moet de optelsom zijn van de twee ingangssignalen (zowel amplitude als fase). Op de inverterende ingang is geen signaal zichtbaar. Dit is namelijk een virtueel aardpunt.

Kristalaansturing Test

Doel: Analyseren van de signaalverwerking door de kristalaansturing en compensatieversterker.

Methode:

- Een SC-cut kristal wordt aangesloten.
- Eén ingang van de kristalaansturing wordt via een sweep aangestuurd met een functiegenerator rond de verwachte resonantiefrequentie.
- De uitgangen van zowel de kristalaansturing als de compensatieversterker worden geobserveerd.
- Met de oscilloscoop worden deze signalen ook onderling vergeleken (verschilsignaal via ‘math’-functie).

Verwachte resultaat:

- De amplitude en faseverschuiving van deze signalen ten opzichte van het ingangssignaal moeten vergelijkbaar zijn met de simulaties zoals beschreven in §6.1.

- Bij resonantie is een duidelijke faseomslag en amplitudeverandering zichtbaar.

Multiplier Test

Voorwaarde: Alleen uitvoeren indien de bovenstaande tests geslaagd zijn.

Doel: Controleren of de multiplier een detecteerbare DC-component genereert nabij resonantie.

Methode:

- Eén ingang wordt via een sweep over een smal frequentiebereik aangestuurd.
- De uitgang van de multiplier wordt met een oscilloscoop gemonitord.

Verwachte resultaat: Nabij de resonantiefrequentie ontstaat een DC-component in de uitgangsspanning. De maximale waarde wordt geschat op circa 50% van de ingangsamplitude.

Lock-Detect Test

Doel: Evalueren of het lock-detectiesysteem correct werkt.

Methode:

- De uitgang van de multiplier wordt opnieuw geswept zoals in de vorige test.
- De ingangsspanning van de comparator wordt gemeten.
- Vervolgens wordt gekeken of de comparator-uitgang (en dus de LED) correct schakelt bij overschrijding van de drempelspanning.

Verwachte resultaat:

- Op resonantie stijgt de DC-spanning boven de comparator-drempel.
- De lock-indicator LED schakelt in overeenkomst hiermee.

Loop filter Test

Doel: Verifiëren of het loop filter het gewenste frequentiegedrag vertoont.

Methode:

- De module wordt los getest met een netwerk analyzer.

Verwachte resultaat:

- De gemeten frequentierespons moet overeenkomen met het verwachte overdrachtsgedrag (laagdoorlaat met bekende knikfrequentie).

VCO Modulatie Test

Doel: Testen van de gevoeligheid van de VCO voor spanningsvariatie.

Methode:

- De ingang van de VCO wordt aangesloten op een variabele DC-bron.
- De uitgangsfrequentie wordt gemeten met een frequentieteller of oscilloscoop.
- Het effect van de instelweerstanden wordt geëvalueerd.

Verwachte resultaat:

- De uitgangsfrequentie moet mee veranderen met de ingangsspanning.

- De mate van frequentieverschuiving moet logisch te relateren zijn aan de ingestelde componentwaarden.

7.2.4 Conclusie

Technische tests

De voedingstest verliep succesvol na het corrigeren van verkeerd geplaatste componenten. Het stroomverbruik bleef binnen de verwachte grenzen, alle IC's ontvingen de juiste spanning en oververhitting werd niet vastgesteld. De VCO-IC werkte grotendeels naar verwachting, ondanks enkele ontwerpbeperkingen. De lineaire VCO bleef zonder uitgangssignaal, maar was niet essentieel voor verdere tests.

Functionele tests

De single-mode lock test mislukte: het systeem vertoonde geen tekenen van lock. Hierdoor zijn de overige functionele tests nog niet uitgevoerd.

Een grondig technisch testplan is opgesteld om de oorzaak te achterhalen. Hierin worden de modules zo veel mogelijk los van de rest beproefd. Het uitvoeren van deze tests betekend dat het project zich weer in de technische testfase bevindt.

8 CONCLUSIE

Doelstelling

Het doel van dit project was het ontwikkelen van een proof-of-concept (PoC) waarmee het principe van temperatuurcompensatie voor QCM-sensoren experimenteel kon worden aangetoond. Daarbij was het streven om de temperatuurgevoeligheid van de sensor met een factor tien te verminderen: van 2 ppm/°C naar 0,2 ppm/°C over een temperatuurbereik van 20 tot 100 °C.

Technische inzichten

Uit theoretisch en experimenteel onderzoek is gebleken dat temperatuurveranderingen effectief kunnen worden gecompenseerd door twee resonantiemodi van dezelfde sensor te meten. Omdat hiervoor geen extra temperatuursensor nodig is, wordt er geen nieuwe meetfout geïntroduceerd. Deze methode maakt het mogelijk om temperatuurveranderingen zeer nauwkeurig te bepalen en direct te compenseren. Het effect is experimenteel aangetoond, al werd de uiteindelijke nauwkeurigheid beperkt door de gebruikte meetmethode.

Verder is uit simulaties gebleken dat een dual-oscillator ontwerp minder geschikt is voor toepassing in een QCM-systeem. In plaats daarvan biedt een phase-locked loop (PLL) een potentieel betere oplossing, al moet dit ontwerp nog experimenteel worden gevalideerd.

Bereikte resultaten

In dit project is een PCB ontwikkeld dat dient als proof-of-concept voor het voorgestelde systeem. Deze printplaat is gerealiseerd, maar functioneert op dit moment nog niet naar behoren. De oorzaak van het probleem is nog niet volledig achterhaald, maar er is een gedetailleerd testplan opgesteld om hier systematisch achter te komen. Op basis van de huidige inzichten wordt verwacht dat het systeem met enkele aanpassingen wel correct zal functioneren. Dit betekent echter dat de oorspronkelijke doelstelling en de gestelde eisen (zie PvE in H3.4) van het project nog niet zijn behaald. Voor een overzicht van de behaalde mijlpalen wordt verwezen naar Tabel 8-1: Overzicht voortgang realisatieTabel 8-1.

Tabel 8-1: Overzicht voortgang realisatie

	Fase/mijlpaal	Status	Toelichting
M1	Eisenanalyse	Afgerond	
M1.1	PvE	Afgerond	
M1.2	Opdracht formulering	Afgerond	
M1.3	Acceptatie testplan	Afgerond	
M2	Functioneel ontwerp	Afgerond	
M2.1	High level design	Afgerond	
M2.2	Onderbouwing ontwerp	Afgerond	
M2.3	Software ontwerp	Niet gedaan	Laten vallen i.v.m. tijdsgebrek
M2.4	Functioneel testplan	Afgerond	
M3	Technisch ontwerp	Afgerond	
M3.1	Elektrisch schema	Afgerond	
M3.2	PCB-ontwerp	Afgerond	
M3.3	Bill of materials	Afgerond	
M3.4	Software realisatie	Niet gedaan	Laten vallen i.v.m. tijdsgebrek
M3.5	Technisch testplan	Afgerond	
M4	Technische tests	Begonnen	
M4.1	Voeding test	Afgerond	
M4.2	Oscillator test	Afgerond	

M4.3	Software test	Niet gedaan	Laten vallen i.v.m. tijdsgebrek
M4.4	Filter test	Niet gedaan	Laten vallen i.v.m. verandering ontwerp
M4.5	Kristaloscillatie test	Niet gedaan	Laten vallen i.v.m. verandering ontwerp
M4.6	Opteller test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M4.7	Kristalaansturing test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M4.8	Multiplier test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M4.9	Lock-detect test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M4.10	Loop filter test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M4.11	VCO-modulatie test	Niet gedaan	Toegevoegd na gefaalde lock-test
M5	Functionele tests	Begonnen	Test gefaald
M5.1	PLL lock test	Begonnen	Test gefaald
M5.2	Temperatuur compensatie test	Niet gedaan	Nog niet aan toe gekomen
M5.3	Massa meet test	Niet gedaan	Nog niet aan toe gekomen
M6	Acceptatie tests	Niet gedaan	Nog niet aan toe gekomen
M6.1	Temperatuur compensatie bij opdamping test	Niet gedaan	Nog niet aan toe gekomen

Vervolgstappen

De eerstvolgende stap is het verder afmaken van het proof-of-concept. Dit begint met grondige technische tests om het onderliggende probleem te identificeren en te corrigeren. Daarna kunnen functionele en acceptatietests worden uitgevoerd om de werking van het systeem als geheel te valideren. Ook zal software moeten worden geschreven waarmee de kalibratieprocedure en de temperatuurcompensatie automatisch kunnen worden uitgevoerd. Bovendien is het van belang om te onderzoeken hoe vaak het systeem opnieuw gekalibreerd moet worden en of kristallen binnen een batch voldoende vergelijkbaar zijn, of dat elk kristal individueel moet worden gekalibreerd. Deze informatie is essentieel om de praktische toepasbaarheid van de technologie te beoordelen.

Aanbevelingen

Indien blijkt dat het PLL-ontwerp aan de verwachtingen voldoet, is het aan te bevelen om in een vervolgproject een all-digital phase-locked loop (ADPLL) variant te ontwikkelen. In dit systeem zijn de fasemeting, het loopfilter en de oscillator volledig digitaal uitgevoerd. Dit maakt het mogelijk om frequenties direct digitaal uit te lezen, waardoor het systeem eenvoudiger, compacter, nauwkeuriger en goedkoper wordt, vooral omdat dure frequentietellers dan overbodig zijn. Tot slot is het raadzaam om een gestandaardiseerde en eventueel geautomatiseerde kalibratieprocedure te ontwikkelen, zeker als blijkt dat frequente herkalibratie noodzakelijk is.

BRONNEN

AD835 Datasheet. (n.d.).

Alvelid, J., & Testa, I. (2019). Fluorescence microscopy at the molecular scale. In *Current Opinion in Biomedical Engineering* (Vol. 12, pp. 34–42). Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.cobme.2019.09.009

Bellardita, M., Di Paola, A., Yurdakal, S., & Palmisano, L. (2019). Preparation of Catalysts and Photocatalysts Used for Similar Processes. *Heterogeneous Photocatalysis: Relationships with Heterogeneous Catalysis and Perspectives*, 25–56. doi: 10.1016/B978-0-444-64015-4.00002-X

CD74HC7046A Datasheet. (2003).

Ferrari, M., Ferrari, V., & Kanazawa, K. K. (2008). Dual-harmonic oscillator for quartz crystal resonator sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 145–146(1–2), 131–138. doi: 10.1016/j.sna.2007.10.087

Front Load Single Sensor. (n.d.). INFICON. Retrieved from <https://www.inficon.com/en/products/thin-film-technology/front-load-single-sensor>

INFICON. (2021). *How Does a Thin Film Monitor Measure Thickness.*

Krasnow B. (2013, November 11). (308) *Intro to sputtering (process to create clear, conductive coatings)* - YouTube. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=9OEz_e9C4KM

M5501119. (n.d.). METcase. Retrieved from <https://www.metcase.co.uk/en/Unicase/M5501119.htm>

Marchand, R., Šachl, R., Kalbáč, M., Hof, M., Tromp, R., Amaro, M., Van Der Molen, S. J., & Juffmann, T. (2021). Optical Near-Field Electron Microscopy. *Physical Review Applied*, 16(1). doi: 10.1103/PhysRevApplied.16.014008

Nanoscience. (n.d.). *Quartz Crystal Microbalance (QCM) | Nanoscience Instruments.* Retrieved from <https://www.nanoscience.com/techniques/quartz-crystal-microbalance/>

OPA656 Datasheet. (2024). Retrieved from www.ti.com

Op-amp Integrator. (2022). Electronics Tutorials. Retrieved from https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_6.html

Sandia. (2021). *HIGH PERFORMANCE DUAL-MODE OSCILLATOR CIRCUITS.*

Sauerbrey, G. (1959). Verwendung von Schwingquarzen zur W~igung diinner Schichten und zur Mikrow~igung*. In *Zeitschrift f~ir Physik* (Vol. 55).

Song et al. (2024). *System and method for deconvolution of real-time mass from the influence of temperature and pressure on the crystal microbalance.* USA.

Summing Amplifier. (2021). Electronics Tutorials. Retrieved from https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_4.html

- Ulansky, V. V., Fituri, M. S., & Machalin, I. A. (2009). Mathematical modeling of voltage-controlled oscillators with the colpitts and clapp topology. *Electronics and Control Systems*, 1(19). doi: 10.18372/1990-5548.19.667
- Veldhuizen M. (2023). *Organogram FMD ELD*. Leiden.
- Wajid, A. (1997). *On the accuracy of the quartz-crystal microbalance (QCM) in thin-film depositions*.
- Wardenaar F. (2025). *QCM Temperatuur Compensatie Project Initiatie Document*. Leiden.
- Wikipedia. (2025). Phase-locked loop. In Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop#Elements

LIJSTEN

LIJST VAN AFKORTINGEN

QCM	Quartz crystal microbalance
UHV	Ultra high vacuum
ppm	Parts per million
PID	Project initiatie document
PoC	Proof of concept
PvE	Programma van eisen
LION	Leids instituut voor onderzoek in de natuurwetenschappen
ELD	Elektronische dienst
FMD	Fijn-mechanische dienst
PLL	Phase-locked loop
VCO	Voltage Controlled Oscillator – spanningsgestuurde oscillator
MoSCoW	Must have, Should have, Could have, Wont have

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1-1: Organogram (klein) (Veldhuizen M., 2023)	7
Figuur 2-1: V-model.....	10
Figuur 2-2: Strokenplanning Inhoudelijk V2 (vergroot in bijlage C).....	12
Figuur 2-3: Strokenplanning Schoolproducten V2 (vergroot in bijlage D)	13
Figuur 3-1: Diagram van een standaard PVD-opstelling(Bellardita et al., 2019)	14
Figuur 3-2: Sputter-opstelling waarin een microscoop-slide wordt gecoat met koper (Krasnow B., 2013)	15
Figuur 3-3: Diagram commercieel QCM-systeem (INFICON, 2021)	15
Figuur 3-4: Functioneel schema ONEM (Marchand et al., 2021)	16
Figuur 4-1: Typische QCM-opstelling (Nanoscience, n.d.).....	19
Figuur 4-2: Schermafbeelding van de netwerk analyser aangesloten op een 3.3MHz SC-cut kristal (M1: C-mode, M2: B-mode, M3: Spurious mode)	20
Figuur 4-3: Commerciële QCM sensor met waterkoeling - De gouden cirkel is het kristal (Front Load Single Sensor, n.d.)	20
Figuur 4-4: Temperatuur respons AT-cut kristal, uit literatuur (y = frequentieverandering in ppm, x = temperatuur in graden C, de verschillende curves geven verschillende snijhoeken aan in hoekminuten)	21
Figuur 5-1: Test resultaten T-f karakteristiek B1-mode en C3-mode (x = temperatuur [°C], y = afwijking frequentie [ppm])	25
Figuur 5-2: Dual oscillator diagram (Sandia, 2021).....	27
Figuur 5-3: PLL-diagram (Wikipedia, 2025)	28
Figuur 5-4: High level design	29
Figuur 6-1: Frequentierespons enkele versterker [Doorgekroken: Amplitude, Stippel: Fase]... <td>32</td>	32
Figuur 6-2: Capaciteit compensatie (Ferrari et al., 2008).....	32
Figuur 6-3: Frequentierespons verschilsignaal (let op y-as) [Doorgekroken: Amplitude, Stippel: Fase]	33
Figuur 6-4: Lock-detect blokschema.....	33
Figuur 6-5: Integratorschakeling(Op-amp Integrator, 2022).....	34
Figuur 6-6: Clapp oscillator-schakeling.....	35
Figuur 6-7: Summing-amplifier (Summing Amplifier, 2021)	36
Figuur 6-8: M5501119 Behuizing (M5501119, n.d.).....	38
Figuur 6-9: Gerealiseerd PCB.....	39
Figuur 7-1: Warmtebeeld van PCB na 15 minuten aan staan (let op: PCB andersom t.o.v. Figuur 6-9)	44
Figuur 7-2: Scopebeeld VCO uitgangssignaal op 6 MHz	45

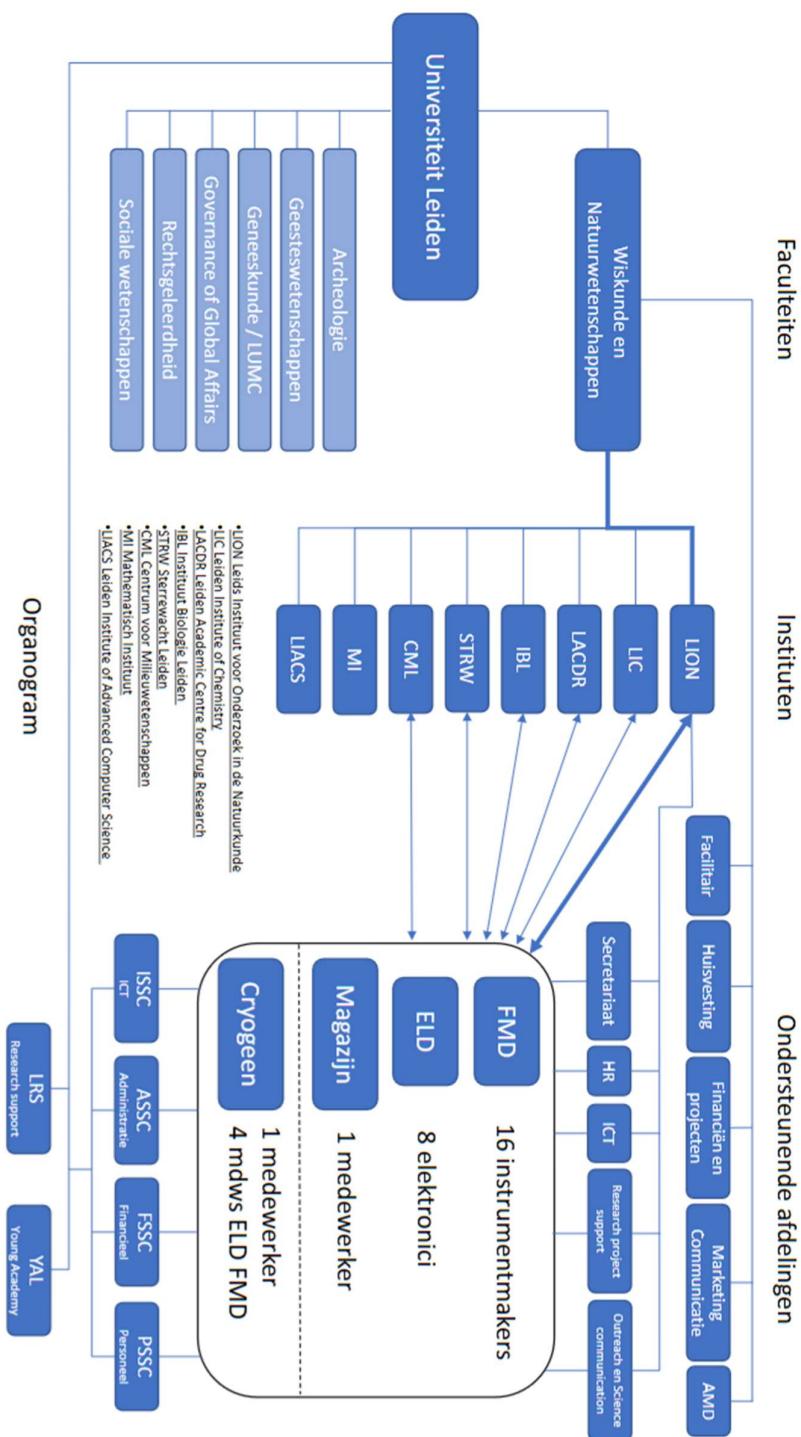
LIJST VAN TABELLEN

Tabel 3-1: PvE - MoSCoW	17
Tabel 7-1: Testniveau overzicht.....	40
Tabel 7-2: Berekening stroomverbruik.....	40
Tabel 3: Overzicht testresultaten	43
Tabel 8-1: Overzicht voortgang realisatie.....	50

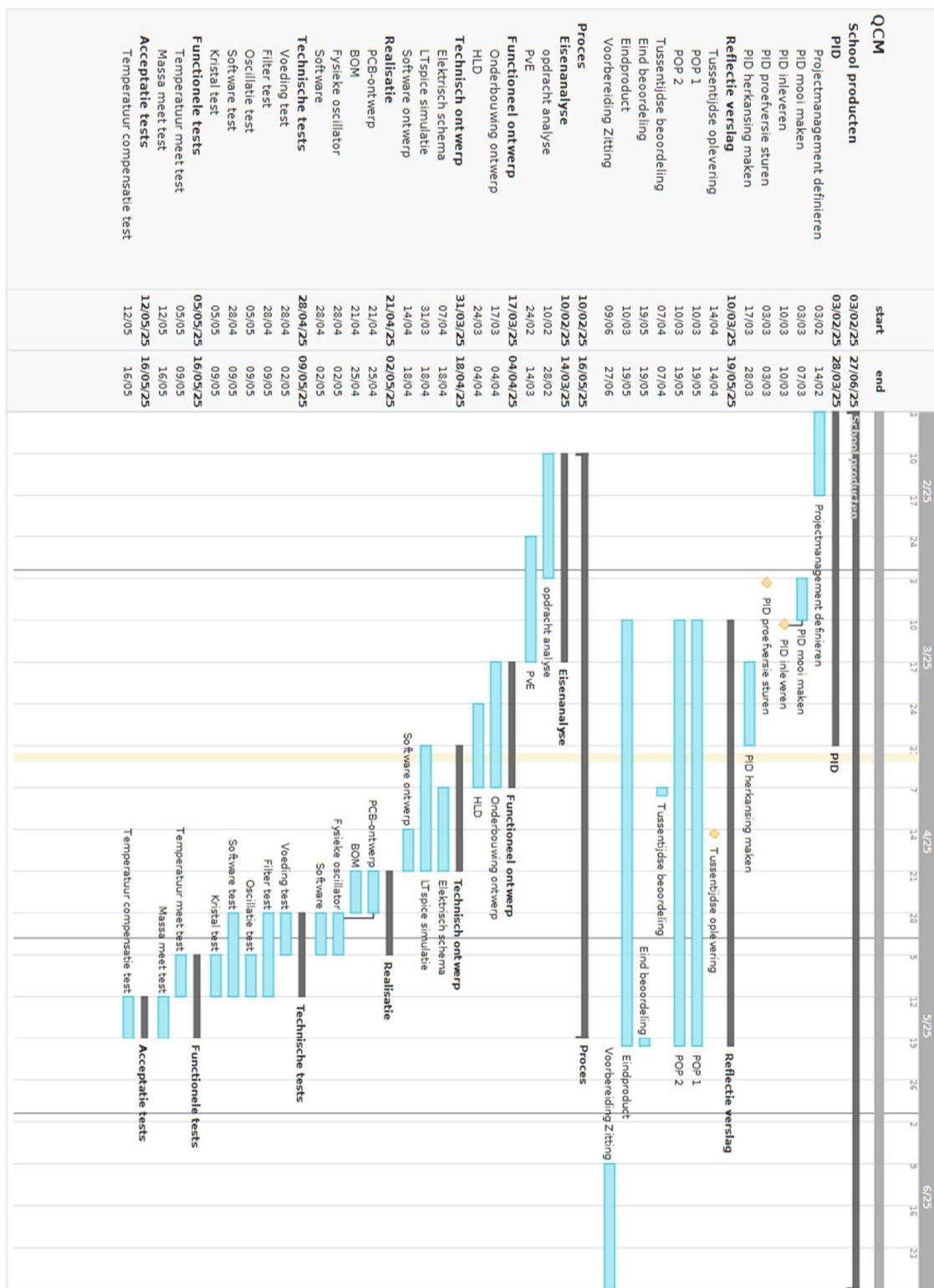
BIJLAGEN

BIJLAGE A - ORGANOGRAM (GROOT)

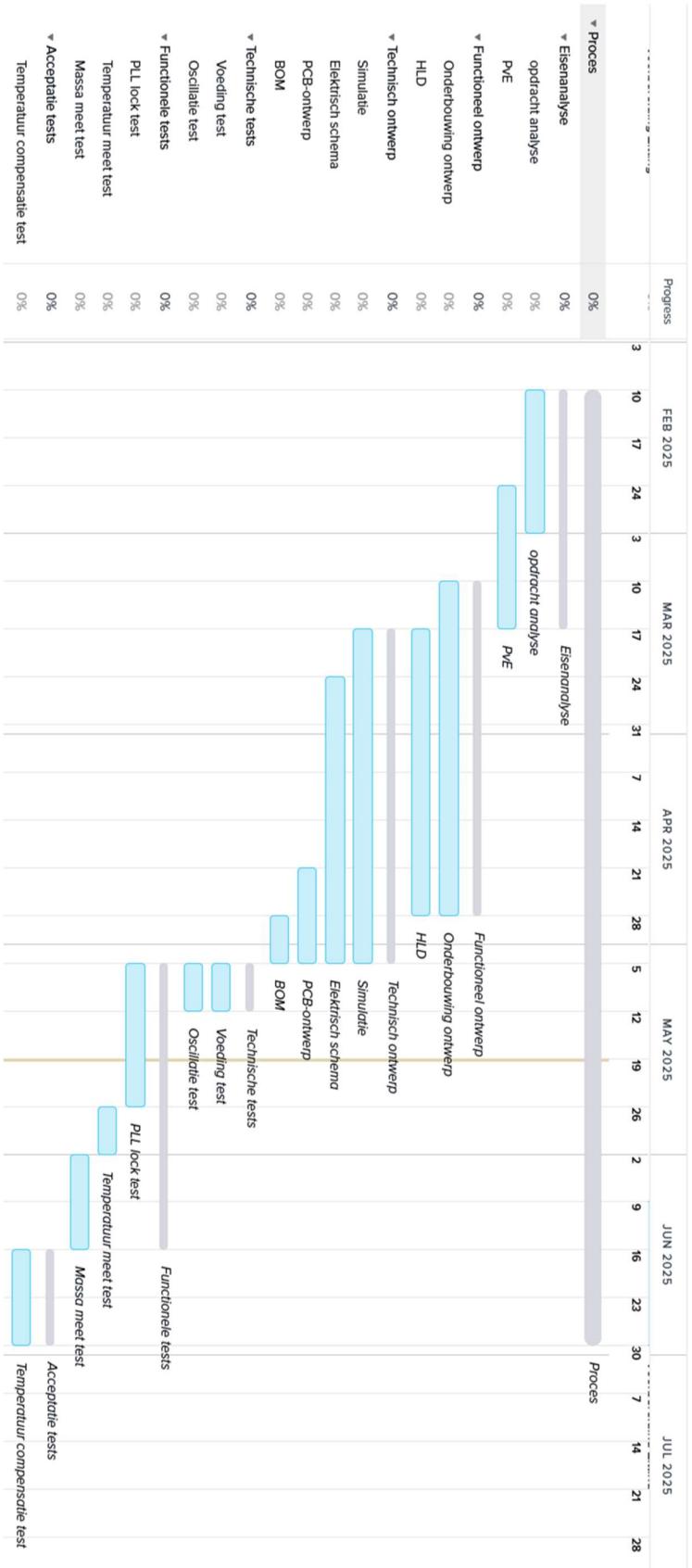
(Veldhuizen M., 2023)



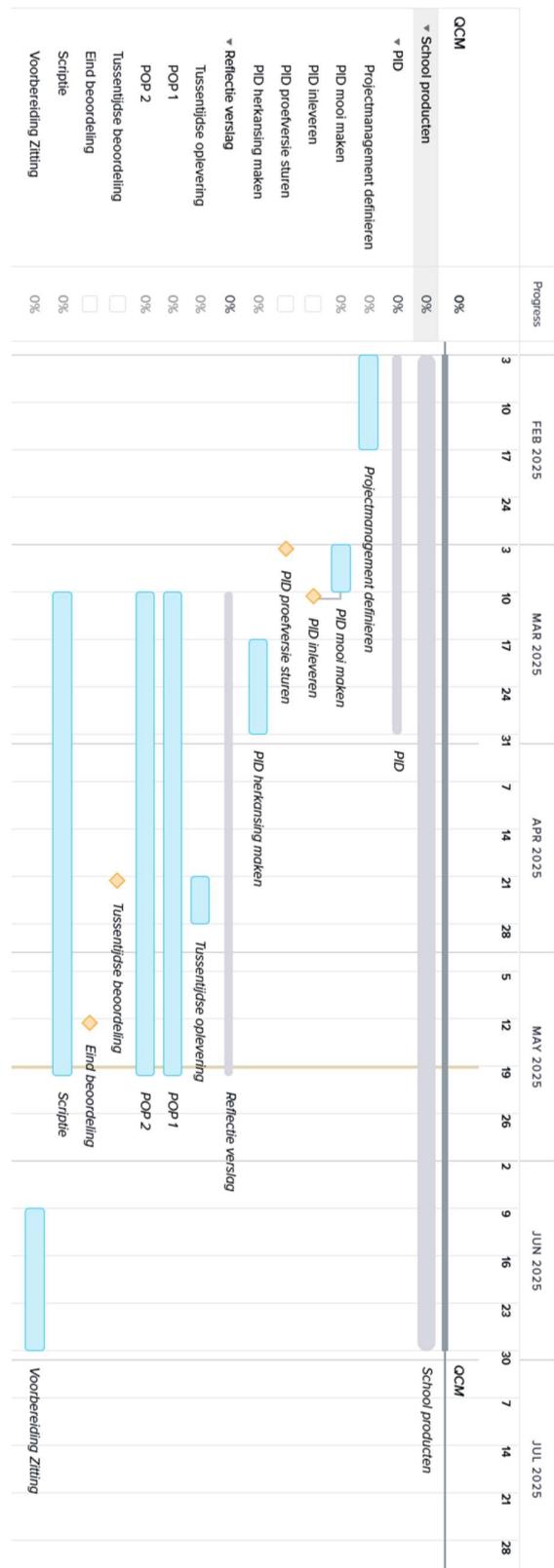
BIJLAGE B - STROKENPLANNING V1 (PID)



BIJLAGE C - STROKENPLANNING INHOUDELIJK V2



BIJLAGE D - STROKENPLANNING SCHOOLPRODUCTEN V2



BIJLAGE F - MEEGELEVERDE DIGITALE BESTANDEN

Bij dit verslag zijn de volgende digitale bestanden toegevoegd in een zip-bestand genaamd QCM_driver.zip. Deze bestanden bevatten het volledige ontwerp van het systeem zoals opgesteld in KiCad, inclusief schema, PCB-layout en BOM.

Bestandsstructuur

QCM_driver.zip	
---QCM_driver/	
---QCM_driver.kicad_pro	- KiCad projectbestand
---QCM_driver.kicad_pcb	- PCB-layout van het volledige systeem
---QCM_driver.kicad_sch	- Hoofdschema waarin subschema's zijn geïntegreerd
---Decoupling.kicad_sch	- Subschema: voeding en ontkoppeling
---Integrate.kicad_sch	- Subschema: loopfilter (integrator)
---Lockdetect.kicad_sch	- Subschema: lock-detectie
---VCO_circuit.kicad_sch	- Subschema: lineaire VCO op basis van Clapp-oscillator
---VCO_IC.kicad_sch	- Subschema: digitale VCO met 74HC7046 IC
---QCM_driver_order.xlsx	- BOM met alle bestelde componenten
---QCM_driver_placement.csv	- Componentplaatsing voor assemblage

Gebruik en openen

Deze bestanden zijn bedoeld als referentie bij de technische uitwerking van het Proof-of-Concept. Ze kunnen worden geopend in KiCad 7.0 of hoger. De schema's zijn modulair opgebouwd voor overzichtelijkheid, en via het hoofdschema (QCM_driver.kicad_sch) zijn alle subschema's gekoppeld.

De BOM (Excel-bestand) en plaatsingsbestand (CSV) zijn bedoeld voor gebruik bij assemblage en bestelling van componenten.